

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Carrera de Agronomía

Estudio del contenido de nutrientes en la savia del pecíolo de *Solanum lycopersicum* L en invernadero de Guachapala

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Agrónoma


Autores:

Tania Maribel Brito Guamán

Patricia Alexandra Cabrera Villa

Director:

Fernando Gerardo Bermúdez

ORCID:  0000-0002-6998-8083

Cuenca, Ecuador

2025-08-05

Resumen

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es un cultivo de gran importancia económica y alimentaria. En el cantón Guachapala-Azuay, su producción en invernadero enfrenta limitaciones por deficiencias nutricionales debido al uso continuo del suelo, manejo inadecuado de fertilización y falta de análisis técnico. Este estudio tuvo como objetivo identificar y caracterizar dichas deficiencias, y determinar la relación entre los niveles de nutrientes en la savia del peciolo y el suelo. Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar (DCA) con tres invernaderos como tratamientos. Se recolectaron muestras de hojas y suelo, y se analizaron N, P, K, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, densidad aparente y textura. Los datos fueron procesados mediante estadística descriptiva, pruebas de normalidad y coeficientes de correlación (Pearson o Spearman). El análisis reveló que el nitrógeno (N) mostró niveles adecuados en la mayoría de las muestras, pero el fósforo (P) presentó deficiencias leves en varios invernaderos. El potasio (K) por el contrario, evidenció excesos en la mayoría de los casos. Al analizar la relación entre los nutrientes en la savia y el suelo, se encontró una correlación significativa entre los niveles de nitrógeno ($r = 0.584$, $p = 0.0462$), indicando una relación moderada. No se encontraron correlaciones significativas para las demás variables. Estos resultados proporcionan información clave para optimizar el manejo nutricional y mejorar la calidad y rendimiento de los cultivos de tomate bajo invernadero, destacando la importancia de ajustar la fertilización según la etapa fenológica del cultivo.

Palabras clave del autor: *Solanum lycopersicum* L., deficiencias nutricionales, fertilización en invernadero, nutrientes en el suelo, savia del peciolo



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is a crop of great economic and nutritional importance. In the Guachapala-Azuay canton, its greenhouse production faces limitations due to nutritional deficiencies caused by continuous soil use, inadequate fertilization management, and the lack of technical analysis. The aim of this study was to identify and characterize these deficiencies and determine the relationship between nutrient levels in the petiole sap and soil. A completely randomized block design (RCBD) was used with three greenhouses as treatments. Samples of leaves and soil were collected and analyzed for N, P, K, pH, electrical conductivity, organic matter, bulk density, and texture. The data were processed using descriptive statistics, normality tests, and correlation coefficients (Pearson or Spearman). The analysis revealed that nitrogen (N) showed adequate levels in most samples, but phosphorus (P) presented mild deficiencies in several greenhouses. Potassium (K), on the other hand, showed excesses in most cases. When analyzing the relationship between nutrients in the sap and soil, a significant correlation was found between nitrogen levels ($r = 0.584$, $p = 0.0462$), indicating a moderate relationship. No significant correlations were found for the other variables. These results provide key information to optimize nutritional management and improve the quality and yield of tomato crops in greenhouses, emphasizing the importance of adjusting fertilization according to the crop's phenological stage.

Author Keywords: *Solanum lycopersicum* L., nutritional deficiencies, greenhouse fertilization, soil nutrients, petiole sap



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

1. Introducción.....	13
2. Objetivos	14
2.1 Objetivo general	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3. Revisión Bibliográfica.....	14
3.1 Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.).....	14
3.2 Taxonomía.....	15
3.3 Producción de tomate riñón a nivel mundial	15
3.4 Producción de tomate riñón en Ecuador.....	16
3.5 Producción de tomate riñón en Guachapala.....	16
3.6 Fenología del tomate riñón.....	16
3.7 Fisiología y requerimientos ambientales en tomate riñón.....	17
3.7.1 Luminosidad o Radiación	17
3.7.2 Temperatura	17
3.7.3 Humedad Relativa	18
3.8 Suelos.....	18
3.8.1 Textura.....	19
3.8.2 Tipos de suelos en Guachapala	19
3.9 Nutrición vegetal y diagnóstico nutricional en tomate	20
3.9.1 Nutrición y riego	20
3.9.2 Optimización de la fertilización y manejo de nutrientes	20
3.9.3 Importancia de los nutrientes en el crecimiento y desarrollo	21
3.9.4 Deficiencias de macronutrientes y micronutrientes en el cultivo.....	21
3.9.5 Trastornos fisiológicos por deficiencia de macro y micronutrientes.....	23
3.10 Análisis foliar.....	24
3.11 Análisis de Extracto de Pecíolo (ECP) como Herramienta de Diagnóstico.....	24
3.11.1 Rangos óptimos de savia de peciolo en tomate	25
4. Materiales y métodos.....	26
4.1 Área de estudio	26
4.2 Manejo Agronómico de los Invernaderos.....	27
4.3 Materiales	27
4.4 Diseño experimental.....	28
4.5 Metodología para el Objetivo específico 1: “Identificar y caracterizar las deficiencias nutricionales en plantas de <i>Solanum lycopersicum</i> L. cultivadas en invernaderos”	29

4.6 Metodología para el objetivo específico 2: “Determinar la relación entre los niveles de nutrientes en la savia del pecíolo y los niveles presentes en el suelo”.....	31
4.7 Análisis de datos	31
5. Resultados	32
5.1 Resultados para el objetivo 1.....	32
5.1.1 Análisis general de los niveles de nutrientes en la savia del pecíolo en los invernaderos evaluados	32
5.1.2 Análisis individual de nutrientes por invernadero y fase de desarrollo	32
5.2 Resultados para el objetivo 2.....	39
6. Discusión.....	53
7. Conclusiones.....	62
8. Recomendaciones	63
9. Referencias	64
Anexos.....	72

Índice de figuras

Figura 1. Ciclo de crecimiento del tomate.....	17
Figura 2. Rangos de pH óptimos para tomate	18
Figura 3. Mapa de ubicación de los invernaderos de tomate riñón - Cantón Guachapala	26
Figura 4. Ubicación de la zona de muestreo en la planta y esquema del diseño experimental	29
Figura 5. Extracción de savia de pecíolos mediante prensa manual durante el muestreo en invernadero.....	30
Figura 6. Comportamiento de parámetros nutricionales en la savia (pecíolo) en la planta tomate en diferentes etapas fenológicas.....	35
Figura 7. Variación de nitrógeno(N) en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3).....	36
Figura 8. Variación de fósforo (P) en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3).....	36
Figura 9. Variación de Potasio (K) en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3).....	37
Figura 10. Variación de conductividad eléctrica (CE) en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)	38
Figura 11. Variación de pH en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)	38
Figura 12. Comportamiento de las diferentes variables del suelo en etapas fenológicas del tomate (<i>Solanum lycopersicum L.</i>).....	41
Figura 14. Correlación entre las concentraciones de fósforo (P) en el suelo y en la savia de <i>Solanum lycopersicum L.</i>	43
Figura 13. Correlación entre las concentraciones de nitrógeno (N) en el suelo y en la savia de <i>Solanum lycopersicum L.</i>	43
Figura 15. Correlación entre las concentraciones de potasio (K) en el suelo y en la savia de <i>Solanum lycopersicum L.</i>	44
Figura 16. Correlación entre los valores de conductividad eléctrica (CE) en el suelo y en la savia de <i>Solanum lycopersicum L.</i>	45
Figura 17. Correlación entre el pH del suelo y de la savia de <i>Solanum lycopersicum L.</i>	45
Figura 18. Correlación entre las concentraciones de nitrógeno(N) en el suelo y en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3) ...	46
Figura 19. Correlación entre las concentraciones de fósforo (P) en el suelo y en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3).....	47
Figura 20. Correlación entre las concentraciones de potasio(P) en el suelo y en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3).....	48

Figura 21. Correlación entre las concentraciones de conductividad eléctrica (CE) en el suelo y en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)..... 49

Figura 22. Correlación entre las concentraciones de pH en el suelo y en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)..... 50

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación taxonómica de <i>Solanum lycopersicum</i> L.....	15
Tabla 2. Interacciones entre nutrientes: excesos que inducen deficiencias en otros nutrientes.....	23
Tabla 3. Rangos óptimos generales de nutrientes en savia de pecíolo en tomate	25
Tabla 4. Rangos óptimos de nutrientes en savia de pecíolo por etapa fenológica del tomate tipo riñón.....	26
Tabla 5. Descripción de las variables analizadas, con su respectiva unidad de medida	29
Tabla 6. Concentraciones de nutrientes en la savia y rangos óptimos de referencia para <i>Solanum lycopersicum</i> L.....	32
Tabla 8. Prueba de normalidad Shapiro-Wilk para las diferentes variables analizadas.....	39
Tabla 9. Correlación entre las variables de nutrientes en savia del pecíolo de las plantas y en el suelo	42
Tabla 10. Correlación entre las variables de nutrientes en savia y suelo en tres invernaderos con diferentes estados fenológicos	51
Tabla 11. Valores de media de materia orgánica (MO), densidad aparente (DA), pH, conductividad eléctrica (CE)	52

Índice de Anexos

Anexo A. Invernaderos de Guachapala utilizados para la investigación.....	72
Anexo B. Proceso de recolección de muestras vegetales	73
Anexo D. Muestreo de suelo en campo	74
Anexo E. Análisis de suelo en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca.....	75
Anexo F. Registro de datos en campo y en laboratorio.....	77
Anexo G. Claves para las clases texturales del suelo (Cuadro 25).....	78
Anexo H. Base de datos utilizada en el procesamiento de resultados.....	79

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Ing. Fernando Bermúdez, tutor de esta tesis, por su guía, compromiso y constante apoyo a lo largo de todo este proceso. También extendemos nuestro agradecimiento a la Ing. Amanda Suqui, por su colaboración y por estar siempre dispuesta a ayudarnos. A los ingenieros Segundo Maita y Walter Larriva, revisores de nuestro trabajo, les agradecemos por sus valiosas observaciones y por contribuir a mejorar esta investigación.

Nuestro especial agradecimiento al señor Moisés Suárez y a su esposa, la señora Carmen Lazo, por permitirnos el uso de sus invernaderos y brindarnos todas las facilidades necesarias para llevar a cabo el estudio.

A nuestros amigos Lilian, Kevin, Israel y Rafael, gracias por su apoyo incondicional, por acompañarnos en este camino y por estar presentes cuando más lo necesitábamos. A nuestros padres, gracias por ser nuestro motor, por su amor, comprensión y por apoyarnos incondicionalmente en cada paso de este camino.

Y de manera muy especial, agradecemos a Juliana, nuestra mejor amiga, por estar siempre a nuestro lado, por su apoyo inquebrantable, por acompañarnos en cada etapa y por ser una parte esencial de esta experiencia. Su presencia hizo este camino más llevadero y significativo.

Tania Maribel Brito Guamán

Patricia Alexandra Cabrera Villa

Dedicatoria

A Dios, con todo mi corazón, por ser mi guía constante, por darme la fortaleza en los momentos difíciles y por brindarme esperanza cuando todo parecía oscurecerse. Este logro es una muestra de que, con fe, todo es posible.

A mis padres, Blanca y Víctor, por sus sacrificios silenciosos y por ser el pilar fundamental en mi formación personal y profesional. Gracias por estar ahí en cada etapa, por su comprensión y por enseñarme que todo esfuerzo tiene su recompensa.

A mi hijo, Juan Daniel, este título está dedicado especialmente para ti. Eres mi mayor inspiración y la razón por la que nunca dejé de avanzar. Espero que algún día veas en mí el ejemplo de que los sueños sí se pueden alcanzar. Todo esto es también por ti y para ti.

A mi hermano, Daniel, que, aunque hoy no está físicamente con nosotros, vive en mi corazón con un amor que el tiempo ni la distancia podrán borrar. Tu partida dejó un vacío profundo, pero también la fuerza para seguir adelante y dar lo mejor de mí. Este logro lleva tu recuerdo grabado con cariño y gratitud eterna. Sé que, donde estés, estás orgulloso de mí.

A mi hermana, Alexandra, gracias por tu compañía constante y tus palabras de aliento cuando más las necesitaba. A mis sobrinas, Samantha y Samara, que con sus sonrisas y su amor inocente me recordaban la importancia de seguir adelante con esperanza.

A mis compañeros de carrera, quienes compartieron conmigo risas, desvelos, cansancio y también muchas alegrías en este largo camino, en especial a Juliana, Patricia, Kevin e Israel. Gracias por convertirse en una parte tan importante de esta etapa, y por llegar a ser más que compañeros: mis mejores amigos. Su amistad fue una de las cosas más valiosas que gané durante estos años.

Con especial gratitud a mi compañera de tesis, Patricia, con quien recorrí este último tramo lleno de retos. A pesar de los desafíos y momentos difíciles, supimos sostenernos mutuamente y superar juntas esta etapa. Juntas logramos más de lo que imaginamos.

Este logro no es un final, sino el inicio de nuevos sueños, nuevos desafíos y nuevas metas. Hoy cierro una etapa con gratitud, pero también abro otras con ilusión y esperanza, con la certeza de que cada paso valió la pena.

Tania Maribel Brito Guamán

Dedicatoria

Gracias a Dios, por el don de la vida, por acompañarme con su luz en cada paso y por brindarme la fortaleza necesaria para superar los momentos difíciles. Mi gratitud eterna a mis padres, Gladys y Luis, quienes han sido el cimiento sólido sobre el que se ha construido cada uno de mis logros. Su amor, sacrificio y dedicación no tienen medida. Su apoyo constante, su fe inquebrantable en mí y el ejemplo de vida que me han dado han sido mi mayor fuente de inspiración. Este logro les pertenece tanto como a mí, pues todo lo que soy y he alcanzado nace de sus enseñanzas sobre el esfuerzo, la perseverancia y la humildad.

A mis hermanos, Alan y Michael, quienes con su cariño y paciencia me han acompañado incluso en los momentos más complejos. A mi hermana Jenny, por su admirable fortaleza y constancia, cualidades que me han impulsado a seguir adelante frente a cualquier dificultad. Y a mi sobrino Pablito, cuya alegría ilumina mis días y me recuerda que siempre hay razones para sonreír.

El amor más puro e incondicional me lo han brindado también mis perritos Bruno y Thor. Su compañía ha sido refugio y alegría. Y en especial a mi fiel amigo Copito, que, aunque ya no está conmigo, permanece vivo en mi memoria, gracias por tantos momentos de consuelo y compañía. Fuiste un amigo leal y una fuente de amor silencioso que jamás olvidaré.

A mis queridas amigas: Doménica, Tania y Juliana. Gracias por acompañarme en este camino con su lealtad, amor y apoyo constante. Doménica, nuestra amistad de tantos años ha sido una fuente inagotable de fortaleza y consuelo, siempre estando a mi lado en los momentos más importantes. Tania, compañera de tesis y amiga incondicional, tu dedicación, paciencia y energía hicieron de este proceso una experiencia aún más enriquecedora. Juliana, gracias por tu sabiduría, tu entusiasmo y por brindarme tu apoyo siempre que lo necesité. Las tres han sido un pilar fundamental en mi vida, y cada una ocupa un lugar muy especial en mi corazón.

Cada uno de ustedes ha sido parte fundamental de este logro. Esta tesis es también suya, porque está tejida con el amor, la compañía y la confianza que me han brindado.

Patricia Alexandra Cabrera Villa

1. Introducción

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los productos hortícolas con mayor relevancia a nivel mundial, esto debido a su importancia económica, alimentaria y nutricional. Representa más del 30 % de la producción hortícola global, alcanzando aproximadamente 243 millones de toneladas anuales, siendo China el principal productor (FAO, 2021). Su alta demanda se debe a su versatilidad gastronómica, contenido nutricional y diversas aplicaciones en la industria agroalimentaria. Además, el consumo regular de tomate contribuye con beneficios para la salud, debido a la presencia de compuestos bioactivos como carotenoides y polifenoles, que tienen propiedades antioxidantes (Marti et al., 2016).

En América Latina, el cultivo de tomate ha tenido un desarrollo significativo, con el desarrollo de tecnologías avanzadas, especialmente en sistemas de producción protegida. Sin embargo, este crecimiento ha traído consigo una creciente competitividad en el mercado, esto ha desencadenado que los pequeños productores mejoren su eficiencia y exploren nuevos nichos para mantener la rentabilidad (Allende, Salinas, & Torres, 2017).

Asimismo, en Ecuador, el tomate riñón es una de las especies vegetales más cultivadas, con una producción de 38,438 toneladas en aproximadamente 2,653 hectáreas, predominando en la región Sierra (SIPA, 2020). A pesar de su importancia económica, la producción de tomate enfrenta diversos desafíos agronómicos, uno de ellos son las deficiencias nutricionales, que afectan negativamente el desarrollo vegetativo, la calidad del fruto y la productividad del cultivo. Estas deficiencias están ampliamente relacionadas con factores como el manejo del suelo, la absorción de nutrientes y las condiciones ambientales específicas de los sistemas bajo invernadero (Jaramillo et al., 2007).

En la provincia del Azuay, particularmente en el cantón Guachapala, el cultivo de tomate riñón representa una fuente importante de ingresos para los agricultores locales. En esta zona, la mayoría de productores trabajan en superficies pequeñas, de aproximadamente 1,000 m², con rendimientos de una caja por metro cuadrado. Aunque la producción se ha mantenido estable, se han presentado problemas que afectan esta producción, tales como la saturación del suelo por monocultivo, el aumento de los costos de insumos químicos y la necesidad de optimizar el manejo nutricional de los cultivos (Banco Central del Ecuador, 2020; Díaz et al., 2017).

No obstante, la persistencia de deficiencias nutricionales en cultivos de tomate riñón tiene causas diversas, entre las cuales se puede mencionar el uso continuo del suelo sin rotación de cultivos, desequilibrio en la fertilización, baja disponibilidad de los agricultores a análisis de suelos y savia, y la falta de formación técnica acerca del manejo nutricional específico para

cultivos bajo invernadero y campo abierto. Esto ha provocado una disminución del rendimiento, frutos con menor calidad comercial, aumento de enfermedades fisiológicas y reducción en los ingresos de los productores locales.

Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo principal identificar y caracterizar las deficiencias nutricionales en plantas de tomate cultivadas en invernadero en Guachapala, así como también determinar la relación entre los niveles de nutrientes en la savia del pecíolo y los niveles presentes en el suelo. Lo que se espera es que estos resultados contribuyan al desarrollo de estrategias de manejo nutricional más eficientes, que permitan optimizar la producción y calidad del tomate, fortaleciendo la sostenibilidad y competitividad del sector hortícola local.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Estudio del contenido de nutrientes en la savia del pecíolo de *Solanum lycopersicum L.* en invernadero de Guachapala.

2.2 Objetivos específicos

Identificar y caracterizar las deficiencias nutricionales en plantas de *Solanum lycopersicum L.* cultivadas en invernaderos.

Determinar la relación entre los niveles de nutrientes en la savia del pecíolo y los niveles presentes en el suelo.

3. Revisión Bibliográfica

3.1 Tomate (*Solanum lycopersicum L.*)

El tomate (*Solanum lycopersicum L.*) es una de las hortalizas más importantes a nivel económico y alimentario en el mundo. Es considerado apreciado gracias a su uso diverso en la cocina, valor nutricional y porque posee una amplia aplicación en la industria agroalimentaria. En los últimos años, un gran número de investigaciones han demostrado que el consumo regular de esta hortaliza está estrechamente relacionado con una menor incidencia de varios tipos de cáncer, esto se le atribuye a los compuestos bioactivos que contiene, tales como carotenoides y polifenoles, los cuales contienen una fuerte acción antioxidante (Marti et al., 2016).

3.2 Taxonomía

Tabla 1. Clasificación taxonómica de *Solanum lycopersicum* L.

Categoría taxonómica	Clasificación
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	<i>Solanum</i>
Especie	<i>Solanum lycopersicum</i> L.

Fuente: Elaborado por Pavan, van Heusden, & Bai. (2009)

3.3 Producción de tomate riñón a nivel mundial

Su importancia económica puede verse reflejada en que esta hortaliza representa más del 30 % de la producción hortícola mundial, teniendo una cosecha total de aproximadamente 243 millones de toneladas. En contraste, en el año 2019, China lideró la producción global con más de 125 millones de toneladas de tomate cultivadas (FAO, 2021). Esta hortaliza resulta ser altamente rentable, lo que ha facilitado el impulso continuo hacia el desarrollo tecnológico, de esta manera, se dio la incorporación de tecnologías avanzadas importadas de países con una larga tradición y liderazgo en el cultivo de tomate, entre los cuales se puede mencionar a los de la región mediterránea.

Sin embargo, en las últimas décadas, ha empezado a surgir la limitación del mercado, junto con los elevados volúmenes de comercialización, esto se le atribuye al incremento de producción en invernaderos destinada al consumo fresco, lo que ha desatado un entorno altamente competitivo. Esto ha obligado a los pequeños productores o agricultores a gestionar de mejor manera sus costos y a explorar mercados internacionales para mantener la rentabilidad de sus operaciones (Allende, Salinas, & Torres, 2017).

3.4 Producción de tomate riñón en Ecuador

En Ecuador, la producción de cultivo de tomate abarca alrededor de 2,653 hectáreas plantadas, con una producción total de 38,438 toneladas, lo que da un rendimiento de 14.91 toneladas por hectárea. La mayor producción de este cultivo se concentra en la Sierra, con 1,976 hectáreas, seguida por la Costa con 633 hectáreas. La región amazónica, por su parte, tiene la menor producción, con solo 43 hectáreas (SIPA, 2020). Las principales provincias productoras incluyen Cotopaxi, Tungurahua, Imbabura, Carchi y Azuay (particularmente en cantones como Paute y Guachapala) (Banco Central del Ecuador, 2020).

3.5 Producción de tomate riñón en Guachapala

La producción de tomate riñón en Ecuador presenta una gran variabilidad dependiendo de la región, pero específicamente el cantón Guachapala, ubicado dentro de la provincia del Azuay, se ha mantenido estable en comparación con otros cantones productores de esta hortaliza. En esta zona, los pequeños productores siguen cultivando en áreas de aproximadamente 1,000 metros cuadrados, manteniendo un rendimiento promedio de una caja por metro cuadrado. No obstante, a pesar de los desafíos relacionados con el incremento de costos debido al uso de insumos químicos y la saturación de los suelos atribuido al cultivo continuo en invernadero, la producción en Guachapala no ha sufrido grandes caídas como en otras zonas del país (Banco Central del Ecuador, 2020).

Por otra parte, la economía del cantón está principalmente centrada en la agricultura, entre los cultivos principales se encuentran: maíz, fréjol, arvejas, tomate de árbol y tomate riñón. Este último tiene una demanda significativa en la provincia, aunque se reconoce que existe la necesidad de mejorar los sistemas productivos de esta hortaliza (Díaz, et al., 2017).

3.6 Fenología del tomate riñón

El ciclo de crecimiento del tomate se divide en dos etapas principales: fase vegetativa y fase reproductiva. La fase vegetativa comienza con la siembra en semillero, seguida por la germinación, la emergencia y el trasplante al campo, este se realiza cuando la planta ha desarrollado entre tres y cuatro hojas verdaderas, aproximadamente entre 30 y 35 días después de la siembra. Esta etapa finaliza con la aparición del primer racimo floral. Por otro lado, la fase reproductiva inicia con la formación del botón floral, esto se da entre los 30 a 35 días posteriores al trasplante. Luego, para completar el llenado del fruto se pueden considerar 60 días para el primer racimo, mientras que, la cosecha comienza aproximadamente a los 90 días. Este período puede extenderse aproximadamente por tres meses, alcanzando entre 8

y 10 racimos en total. En conjunto, la fase reproductiva tiene una duración estimada de 180 días. Cabe mencionar que el ciclo va a depender de la zona en donde se encuentre el cultivo, ya que va a tener diferentes características físicas y químicas del suelo, al igual que las condiciones climáticas no van a ser similares (Jaramillo et al., 2007).

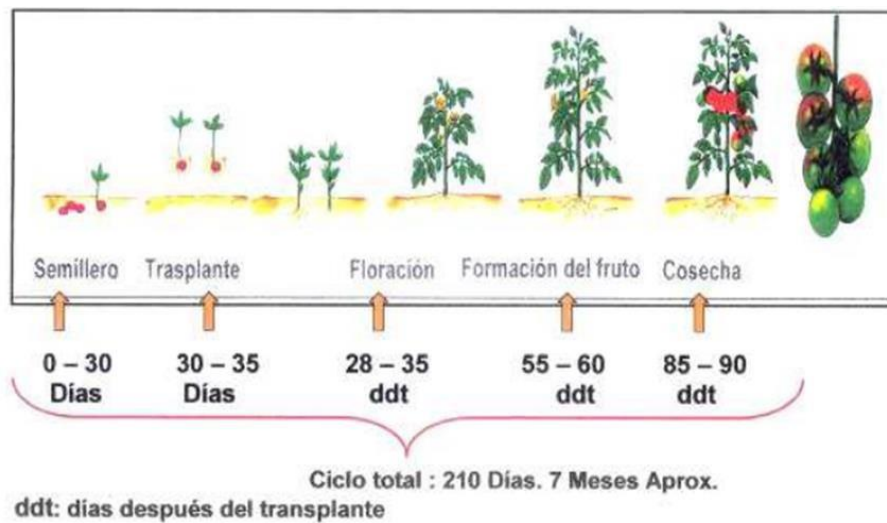


Figura 1. Ciclo de crecimiento del tomate.

Fuente: Jaramillo et al., (2007)

3.7 Fisiología y requerimientos ambientales en tomate riñón

3.7.1 Luminosidad o Radiación

El tomate riñón es un cultivo hortícola que no depende del fotoperíodo, es decir, la duración del día no influye significativamente en su crecimiento. En contraste, para que esta hortaliza alcance un desarrollo adecuado, requiere entre 8 y 16 horas de luz diarias (Chemonics International Inc, 2008).

3.7.2 Temperatura

La temperatura influye directamente en el crecimiento del tomate, siendo óptima dentro de un rango específico. Las temperaturas bajas pueden reducir la absorción de nutrientes, especialmente fósforo, provocando hojas violáceas y deformaciones. Para minimizar estos efectos, es recomendable proteger los cultivos del viento y regular la temperatura del invernadero (Asociación de Agrónomos Indígenas de Cañar, 2003). El desarrollo óptimo del

tomate ocurre entre 28-30°C durante el día y 15-18°C en la noche. Fuera de este rango, la floración y el cuajado del fruto pueden verse afectados, aunque algunas variedades toleran mejor el calor (Chemonics International Inc, 2008).

3.7.3 Humedad Relativa

La humedad relativa es un factor clave en el cultivo de tomate bajo invernadero. Niveles inferiores al 50 % pueden provocar la deshidratación de la planta y favorecer el desarrollo de enfermedades como *Oidium sp.*, mientras que valores excesivamente altos reducen la absorción de agua y nutrientes, causando deficiencias de calcio y afectando la producción. El rango óptimo se encuentra entre 50 y 70 % (Asociación de Agrónomos indígenas de Cañar, 2003).

3.8 Suelos

El suelo proporciona a la planta agua, nutrientes, oxígeno y soporte estructural. Para un óptimo desarrollo del tomate, se recomienda utilizar suelos con media a alta fertilidad, de gran profundidad y con buen drenaje. Los tipos de suelo más adecuados son los franco-arenosos, arcillo-arenosos y orgánicos. Además, el pH debe mantenerse entre 5.9 y 6.5 para garantizar la disponibilidad de nutrientes esenciales y maximizar la eficiencia de los fertilizantes aplicados (Chemonics International Inc., 2008).

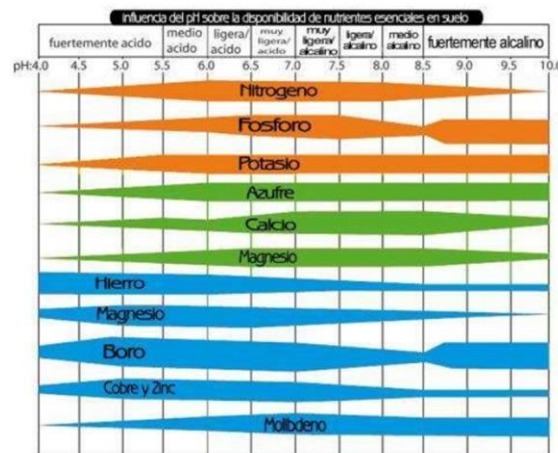


Figura 2. Rangos de pH óptimos para tomate.

Fuente: Jaramillo et al., (2007)

3.8.1 Textura

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2009) señala que la textura del suelo puede estimarse en campo mediante pruebas manuales simples, usando muestras húmedas, sin grava ni fragmentos mayores a 2 mm. Estas pruebas permiten identificar la proporción de arena, limo y arcilla. La arena no es moldeable, no se adhiere a los dedos y tiene una sensación áspera y granulosa. El limo se siente harinoso, se adhiere levemente y es débilmente moldeable. La arcilla, por su parte, es cohesiva, muy moldeable, pegajosa y presenta una superficie brillante al comprimirla. Según estas características y la capacidad del suelo para formar cilindros. Esta herramienta es útil para clasificar suelos en terreno y entender su comportamiento físico, especialmente en estudios agrícolas y ambientales.

3.8.2 Tipos de suelos en Guachapala

En el cantón Guachapala, se puede encontrar en su mayoría suelos de textura arcillosa, los cuales se dividen en distintos tipos según sus características específicas:

- **Dystropepts:** Se originan de materiales volcánicos (piroclásticos) y contienen minerales alofánicos. Son suelos francos con capacidad para retener agua y un contenido muy alto de materia orgánica, superando el 20% de carbono. Presentan colores que varían entre rojo y pardo amarillento, son de textura arcillosa y se localizan en zonas de relieve ondulado o fuertemente inclinado, en laderas de pendientes variables.
- **Uderts:** Estos suelos tienen más de 30% de arcilla de tipo montmorillonita, presentan grietas durante la época seca, una alta capacidad de intercambio catiónico y un pH casi neutro. Se encuentran en zonas de pendientes moderadas (entre 12% y 25%), generalmente en las partes bajas de las cuencas, a altitudes que varían desde los 2200 a 2800 metros.
- **Histic Hydrandepts y Histic Cryandepts:** derivados de materiales piroclásticos, son suelos francos y retienen gran cantidad de agua. Presentan baja saturación de bases (menos del 50%), asimismo, cuentan con una densidad aparente superior a 0,85 g/cc. Por otra parte, el color va a variar según el clima que presenta: son muy negros en zonas frías y algo más claros en regiones térmicas. Principalmente se los puede encontrar en zonas altas de la cordillera, sobre terrenos de más del 12% de pendiente, alcanzando altitudes aproximadas a los 3200 metros.

- **Tropudalfs y Eutropepts:** Son caracterizados por poseer una coloración rojiza o pardo amarillenta y su gran proporción de arcilla. Su formación proviene de rocas madre poco alteradas. Estos suelos se encuentran en áreas húmedas, en sectores donde el relieve tiene fuertes pendientes que van desde el 20% hasta el 70%.

(GAD Guachapala, 2014).

3.9 Nutrición vegetal y diagnóstico nutricional en tomate

3.9.1 Nutrición y riego

Para lograr una buena producción de tomate bajo invernadero, se debe manejar adecuadamente el riego, la fertilización y la aireación, ya que estas prácticas inciden directamente en el rendimiento y la calidad del fruto. Se debe considerar aplicar soluciones nutritivas con concentraciones adecuadas (ppm o mmol/l) para mejorar el crecimiento y vigor de la planta, para que no existan excesos que puedan perjudicarla. Estudios demuestran que combinaciones adecuadas de riego, fertilización y aireación mejoran la productividad del agua, la maduración y el contenido de licopeno del fruto (Sun et al., 2024).

Por otra parte, el calcio y el magnesio se obtienen a través de la cal dolomítica que se utiliza para elevar el pH del sustrato, mientras que otros nutrientes pueden incorporarse antes de la siembra o a través de la fertirrigación. Para una rápida disponibilidad de los elementos esenciales, se puede hacer uso de fertilizantes solubles como nitrato de calcio, nitrato de potasio, sulfato de potasio, fosfato monoamónico y sulfato de magnesio, complementados con micronutrientes esenciales como cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo), manganeso (Mn), zinc (Zn) y hierro (Fe) (Escobar & Lee, 2009).

3.9.2 Optimización de la fertilización y manejo de nutrientes

La calidad en la producción de tomate es importante para determinar su precio y aceptación en el mercado. Para el tomate fresco, se valoran especialmente el sabor, aroma y textura. Además, las variaciones en la calidad de los frutos de tomate se deben a muchos factores, entre ellos el sistema de producción utilizado, el genotipo de la planta, la nutrición, y el tipo de fertilización, ya sea orgánica o mineral, así como las aplicaciones foliares. Además, la elección y el manejo adecuado de los fertilizantes contribuirá en la mejora de la calidad de los frutos (Pérez et al., 2017).

Los métodos modernos de cultivo se enfocan específicamente en la aplicación de fertilizantes minerales para así incrementar la producción cuantitativa, descuidando por lo general la

calidad interna y externa de los frutos (Terry, Ruiz, & Carrillo, 2018). La nutrición foliar es utilizada como complemento y no como sustituto de la nutrición radicular, ya que su aporte es casi nulo. El potasio es esencial para el buen desarrollo del cultivo, influyendo en la firmeza y calidad organoléptica del fruto y en la uniformidad de la maduración. Los frutos de plantas deficientes en potasio son menos rojos y firmes, y presentan paredes más delgadas y lóculos no completamente llenos. La presencia de potasio favorece la formación de carbohidratos como el azúcar, almidón y féculas, y aumenta la consistencia y dureza de los tejidos de las plantas, lo que mejora la resistencia a ciertas enfermedades (Leguizamón et al., 2024).

Por otra parte, las dosis de los fertilizantes como nitrógeno, fósforo y potasio han demostrado ser eficaces en mejorar la producción y la calidad de los frutos, para el cultivo de tomate bajo invernadero con rendimientos cercanos a 120 toneladas por hectárea se recomienda las siguientes cantidades aproximadas: 340 kg/ha de nitrógeno (N), 130 kg/ha de fósforo (P) y 300 kg/ha de potasio (K), considerando la eficiencia de absorción y el aporte del suelo. Cabe recalcar que estas cantidades pueden variar según las condiciones edafoclimáticas, el análisis del suelo y el sistema de manejo adoptado, por lo que se recomienda ajustar la fertilización en función del diagnóstico nutricional del cultivo (Allende, Salinas, & Torres, 2017).

3.9.3 Importancia de los nutrientes en el crecimiento y desarrollo

El manejo adecuado de nutrientes es clave para el crecimiento y desarrollo del tomate, tanto en campos abiertos como en cultivos fuera de temporada. Los nutrientes esenciales se dividen en macronutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre) y micronutrientes (hierro, molibdeno, boro, cobre, manganeso, zinc y cloro), estos son primordiales para el desarrollo del follaje, la floración y el agrandamiento de los frutos. Por ejemplo, el nitrógeno favorece el crecimiento del follaje, el fósforo es indispensable para la producción de frutos, y el potasio es necesario para su desarrollo (Ahmad et al., 2018). Por otro lado, los micronutrientes, incluyendo hierro, molibdeno, boro, cobre, manganeso, zinc y cloro, son necesarios en menores cantidades, pero cumplen funciones destacables en procesos metabólicos y enzimáticos. La falta de estos elementos puede desencadenar alteraciones en el desarrollo del cultivo, reduciendo su productividad y calidad (Meza et al., 2013).

3.9.4 Deficiencias de macronutrientes y micronutrientes en el cultivo

El correcto suministro de nutrientes es importante para el desarrollo del tomate, ya que su rápido crecimiento y alta carga de frutos requieren un balance correcto de elementos

esenciales (Chapagain & Wiesman, 2004). En cuanto a la deficiencia de micronutrientes, en el caso del calcio (Ca), esta es una de las más significativas, ya que puede causar pudrición apical del fruto, afectando su calidad y comercialización. De manera similar, la falta de magnesio (Mg) puede reducir la fotosíntesis, debilitando el crecimiento y provocando clorosis en las hojas inferiores. El azufre (S), por otro lado, ayuda en la síntesis de aminoácidos esenciales, y su deficiencia puede afectar la formación de proteínas necesarias para el desarrollo vegetal (Fanasca et al., 2006).

La deficiencia de macronutrientes en el cultivo de tomate puede causar diversos síntomas visuales y fisiológicos que afectan su desarrollo. Por ejemplo, la carencia de potasio (K) ocasiona la acumulación de compuestos nitrogenados solubles, provocando manchas necróticas en las hojas que pueden confundirse con enfermedades foliares causadas por patógenos. En cuanto al fósforo (P), a pesar de ser requerido en menor cantidad que otros macronutrientes primarios, cumple funciones fundamentales en procesos estructurales, enzimáticos y energéticos, incluyendo la fosforilación, la síntesis de nucleótidos y ácidos nucleicos, así como en la formación de fosfolípidos de membranas celulares, división celular y metabolismo de azúcares y almidón (Eguez & Ramos, 2022).

Estos macronutrientes, junto con el potasio, son útiles para el rendimiento y la calidad del fruto. Una aplicación deficiente de nitrógeno va a limitar el crecimiento vegetativo, mientras que su exceso contribuye a reducir la concentración de azúcares, de esta manera, afectando el sabor y la firmeza. Por otra parte, la deficiencia de potasio va a disminuir el rendimiento y la resistencia al estrés hídrico. Asimismo, aunque el fósforo ayuda al desarrollo radicular, su impacto en la calidad del fruto es menor en comparación con otros nutrientes (Jaramillo et al., 2007).

Sin embargo, para evitar deficiencias nutricionales, es necesario realizar una fertilización equilibrada, que sea la adecuada para cada etapa de desarrollo de la planta (Savvas et al., 2008). En contraste, implementar estrategias como la fertiirrigación permite un suministro preciso de nutrientes, optimizando la absorción y el rendimiento del cultivo. Además, el manejo del suelo con enmiendas orgánicas, como compost o estiércol, mejora la disponibilidad de nutrientes y la estructura del suelo, favoreciendo un crecimiento saludable del tomate (Bar-Yosef, 1999).

Tabla 2. *Interacciones entre nutrientes: excesos que inducen deficiencias en otros nutrientes.*

Nutriente en exceso	Deficiencia inducida
Nitrógeno	Potasio, magnesio
Potasio	Nitrógeno, calcio, magnesio
Cloro	Nitrógeno
Azufre	Molibdeno
Sodio	Potasio, calcio, magnesio
Calcio	Potasio, magnesio, boro, manganeso, zinc
Magnesio	Calcio
Manganeso, cobre, hierro	Zinc
Hierro	Manganeso, zinc
Manganeso, zinc	Hierro
Fósforo	Hierro, zinc

Fuente: Elaborado por Jaramillo et al., (2007)

3.9.5 Trastornos fisiológicos por deficiencia de macro y micronutrientes

Los trastornos fisiológicos generalmente están relacionados con deficiencias nutricionales y condiciones ambientales adversas. La podredumbre apical (BER), es uno de los problemas más comunes y se debe principalmente a una deficiencia local de calcio (Ca) en la parte distal del fruto, lo que provoca desorganización tisular y necrosis. Además de los bajos niveles de Ca en la zona radicular, factores como un exceso de potasio (K), magnesio (Mg) y amonio (NH_4^+) pueden reducir la absorción de Ca, aumentando la incidencia de BER (Willumsen et al., 1996). Por otro lado, las manchas doradas en los frutos están relacionadas con un exceso de Ca, lo que concluye que tanto la deficiencia como el exceso de este nutriente pueden generar problemas en la calidad del fruto. Asimismo, la maduración irregular, incluyendo la pared gris, se asocia con bajas concentraciones de K y nitrógeno (N) en la zona radicular,

además de condiciones climáticas adversas, como temperaturas elevadas y baja radiación solar (Savvas et al., 2008).

3.10 Análisis foliar

El análisis foliar se define como un estudio de relación entre la cantidad de nutrientes presentes en las hojas y el desarrollo general de la planta, normalmente esta concentración se expresa en % con base en el peso seco del tejido, dicho análisis se ha convertido en un pilar fundamental para otros métodos de evaluación de la fertilidad del suelo. Estos enfoques son especialmente útiles en zonas donde no existen sistemas eficientes de análisis de suelo y son ampliamente preferidos en cultivos perennes, como se explicará más adelante (Martín & Pérez, 1992).

El análisis foliar es una herramienta utilizada para identificar deficiencias nutricionales y así poder implementar estrategias de fertilización adecuadas, especialmente en etapas específicas del crecimiento, como la formación de frutos (1-3 cm de diámetro). Si se realiza en etapas tempranas, como en la floración inicial, es posible corregir deficiencias mediante aspersiones foliares. Las muestras deben provenir de hojas sanas, preferiblemente de la tercera a quinta hoja desarrollada desde la yema terminal, evitando aquellas dañadas por insectos, enfermedades o herbicidas. Para interpretar correctamente los resultados, es necesario compararlos con los rangos o niveles críticos ya establecidos, siempre tomando en consideración que estos valores pueden variar según diversos factores, como las condiciones climáticas, el ritmo de crecimiento de la planta y la presencia o ausencia de otros nutrientes esenciales (Jaramillo et al., 2007).

3.11 Análisis de Extracto de Pecíolo (ECP) como Herramienta de Diagnóstico

El análisis de la savia del pecíolo es una herramienta que facilita la determinación temprana del estado nutricional de las plantas. Esta técnica ofrece resultados en tiempo real, lo que permite detectar niveles de exceso o deficiencias nutricionales. Desde un punto de vista histórico los primeros estudios sobre el efecto de la fertilización en la composición de la savia fueron realizados en los años 1930 por el Dr. Pettinger y el Dr. Arnon en Estados Unidos. Posteriormente, en la década de 1970, se publicaron en Europa investigaciones que buscaban interpretar adecuadamente los datos obtenidos. En Florida, el Dr. George Hochmuth, de la Universidad de Florida, ha sido uno de los principales impulsores de esta técnica, especialmente en cultivos hortícolas e invernaderos, destacando el uso de dispositivos portátiles y pruebas rápidas (Esteves, Alcon & Soranz, 2021)

El (ECP) es una técnica que complementa los análisis químicos de los tejidos vegetales dando así una evaluación semicuantitativa de los nutrientes, esta técnica ha sido especialmente útil para evaluar el estado nutricional y los riesgos de salinidad en cultivos intensivos, ya sea en sistemas de fertirriego, suelos o sustratos. El ECP permite realizar diagnósticos en el campo y establecer índices de referencia que ayudan a ajustar el manejo nutricional de los cultivos de manera oportuna (Llanderal et al., 2020).

Sin embargo, uno de los desafíos de este método es la dificultad para interpretar los resultados, ya que no siempre es fácil determinar si un nutriente está presente en exceso o en deficiencia, lo cual puede afectar el rendimiento de las plantas. A pesar de estas limitaciones, la medición de iones en el ECP se utiliza ampliamente en sistemas de producción intensivos, debido a su buena relación con el rendimiento de los cultivos, en comparación con otros métodos de diagnóstico tradicionales en laboratorio. Esta técnica resulta ser una opción eficiente y práctica para evaluar el estado nutricional de los cultivos y, de esta forma, influir en su rendimiento (Flores et al., 2021). Además, conocida como una herramienta, rápida y eficaz pues permite determinar el estado nutricional de la planta mediante la medición de nutrientes en la savia del peciolo de la hoja (Ávila & Rodríguez, 2020).

3.11.1 Rangos óptimos de savia de peciolo en tomate

En las tablas 3 y 4 se pueden apreciar los rangos óptimos de nutrientes en la savia del peciolo del tomate, tanto a nivel general como por etapa fenológica en el caso del tomate de mesa. Estos valores permiten evaluar con precisión el estado nutricional del cultivo y realizar ajustes oportunos en la fertilización. Cabe destacar que el fósforo mantiene un valor constante de referencia (176 ppm) en todas las etapas, según Segura (1995), mientras que el nitrógeno y potasio varían significativamente según el desarrollo fenológico (Hochmuth, 1994).

Tabla 3. Rangos óptimos generales de nutrientes en savia de peciolo en tomate

Nutriente	Rango óptimo (ppm)
Nitrógeno (N)	400-600
Fósforo (P)	176
Potasio (K)	3000-3500

Fuente: Adaptado de Hochmuth (1994) y Segura (1995)

Tabla 4. Rangos óptimos de nutrientes en savia de pecíolo por etapa fenológica del tomate tipo riñón.

Etapa fenológica	Nitrógeno (ppm)	Fósforo (ppm)	Potasio (ppm)
MS1 (Cosecha)	200-400	176	2000-2500
MS2 (Fructificación)	400-600	176	3000-3500
Ms3 (Crecimiento vegetativo)	1000-1200	176	3500-4000

Fuente: Adaptado de Hochmuth (1994) y Segura (1995)

4. Materiales y métodos

Según el protocolo de investigación, establecido en este trabajo de titulación se procedió de la siguiente manera:

4.1 Área de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en invernaderos situados en la provincia del Azuay, específicamente en el cantón Guachapala. Este cantón está ubicado en la sierra sur del Ecuador, tiene una superficie de 41.007 km². Se encuentra a una altitud que varía desde los 2200 msnm y 3200 msnm con una temperatura promedio que oscila entre los 14° a 16°C (GAD Guachapala, 2014).

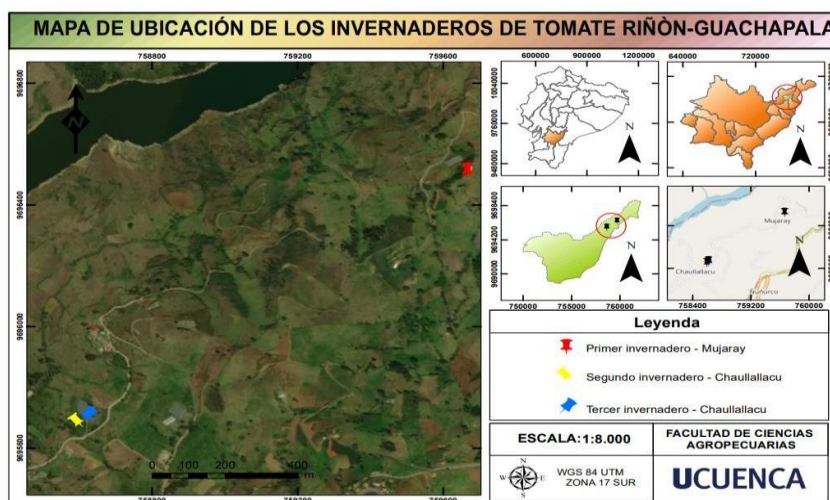


Figura 3. Mapa de ubicación de los invernaderos de tomate riñón - Cantón Guachapala

Fuente: Elaboración propia con datos de CONALI, OpenStreetMap y sus colaboradores (CC-BY-SA), Esri, Maxar, Earthstar Geographics y la comunidad de usuarios GIS.

4.2 Manejo Agronómico de los Invernaderos

En los tres invernaderos evaluados (MS1, MS2 y MS3), el manejo agronómico combinó prácticas de fertilización orgánica y química, junto con estrategias fitosanitarias específicas.

En el invernadero MS1, correspondiente a la etapa de cosecha, se aplica un quintal de abono orgánico por cama durante la siembra. Esta fertilización se complementa con 40 libras de fertilizantes químicos por cama, distribuidos de la siguiente manera: 10 libras de muriato de potasio, 15 libras de fertilizante 18-18-18, 5 libras de abono azul, 5 libras de abono morado y 5 libras de Nerthus Vigorem.

En los invernaderos MS2 y MS3, correspondientes a las etapas de fructificación y crecimiento vegetativo respectivamente, se incrementa la dosis de abono orgánico a 2 quintales por cama y la de fertilizantes químicos a 70 libras por cama, manteniendo la misma proporción de los componentes químicos utilizados en MS1.

Para el manejo de enfermedades radiculares, se utiliza Captan como desinfectante en el momento de la siembra. A los tres días posteriores, se aplica Raizal o Multiraíces para estimular el desarrollo radicular. A las tres semanas de la siembra, se incorporaron 2 libras de Hakaphos violeta por cama, repitiendo esta aplicación cada 8 días durante dos o tres ocasiones. Posteriormente, cuando las plantas superan un mes de desarrollo, se sustituye por Hakaphos naranja.

Para prevenir la acumulación de sales en el suelo, se aplican ácidos húmicos cada 15 días. El control fitosanitario incluye la aplicación de productos químicos contra la mosca blanca el mismo día de la siembra y de manera repetida cada 5 días. Además, se aplica Fitoraz para el control de lancha (tizón tardío) cuando las plantas alcanzan un mes de edad, Fidelity para la mosca blanca y Kasumin para la prevención de Botrytis.

4.3 Materiales

Para la recolección, procesamiento y análisis de las muestras en este estudio, se utilizaron los siguientes materiales:

Materiales para la recolección de muestras:

- Cooler para el transporte y conservación de muestras.
- Bolsas plásticas para el almacenamiento de muestras de suelo y tejido vegetal.
- Cinta adhesiva para el etiquetado de las muestras.
- Libreta de campo para el registro de datos en cada muestreo.

Instrumentos para el análisis de muestras de savia de los peciolo:

- Medidor de conductividad eléctrica portátil HORIBA LAQUAtwin EC-11, con rango de 0 a 19.99 mS/cm y precisión de ± 0.1 mS/cm.
- Medidor de pH portátil HORIBA LAQUAtwin pH-11, con rango de medición de 0.0 a 14.0 pH y precisión de ± 0.1 pH.
- Medidor de potasio portátil HORIBA LAQUAtwin K-11, con rango de medición de 4 a 9900 ppm (mg/L) y precisión de ± 10 %.
- Medidor de nitratos portátil HORIBA LAQUAtwin NO₃⁻-11, con rango de medición de 6 a 9900 ppm (mg/L) y precisión de ± 10 %.
- Checker para fósforo marca Hanna, con rango de medición de 0 a 15 ppm y precisión de ± 0.2 ppm ± 5 % a 25 °C (77 °F).

Materiales para el muestreo de suelo y tejido vegetal:

- Anillos para la determinación de densidad aparente del suelo.
- Pala para la extracción de muestras de suelo.
- Caja de madera para el almacenamiento y transporte de muestras de suelo.
- Cuchillo para el corte de peciolo y hojas.
- Prensa manual para la extracción de savia del peciolo.

4.4 Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), en el que cada invernadero representó un tratamiento, debido a que presentaban diferencias en las condiciones de manejo agronómico. Cada tratamiento (invernadero) se dividió en cuatro filas, las cuales actuaron como repeticiones, asegurando uniformidad en la distribución del muestreo, incluso en aquellos invernaderos que contaban con más filas de plantas. Dentro de cada fila (repetición), se seleccionaron al azar dos plantas por columna. De cada planta (unidad experimental), se recolectaron dos hojas maduras de la parte media, también elegidas de manera aleatoria. Este procedimiento permitió un adecuado control de la variabilidad interna de los invernaderos y garantizó una correcta aleatorización en la selección de las muestras.

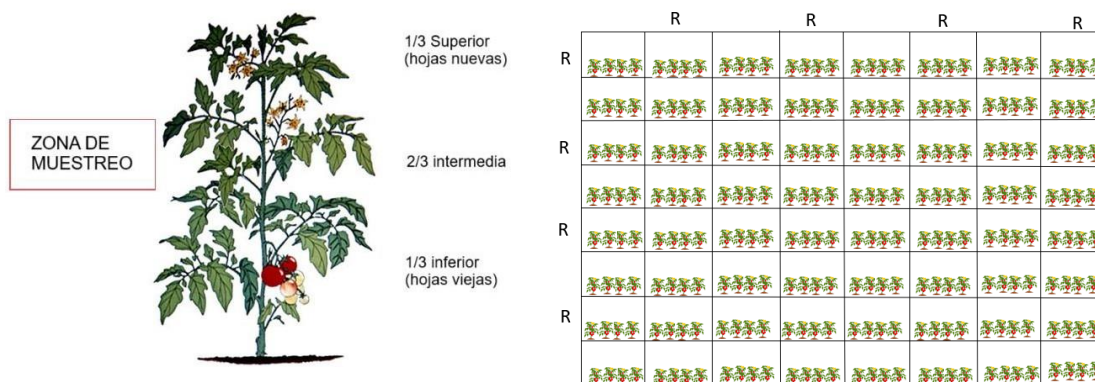


Figura 4. Ubicación de la zona de muestreo en la planta y esquema del diseño experimental

Fuente: Brito & Cabrera (2025).

A continuación, se detallan las variables estudiadas en la investigación.

Tabla 5. Descripción de las variables analizadas, con su respectiva unidad de medida.

Variable	Unidad
Nitrógeno	ppm
Fósforo	ppm
Potasio	ppm
pH	Unidades de pH
Conductividad eléctrica (CE)	mS/cm
Densidad aparente (DA)	g/cm ³
Materia orgánica (MO)	%
Textura	%

Fuente: Brito & Cabrera (2025).

4.5 Metodología para el Objetivo específico 1: “Identificar y caracterizar las deficiencias nutricionales en plantas de *Solanum lycopersicum* L. cultivadas en invernaderos”

Para identificar y caracterizar las deficiencias nutricionales en plantas de *Solanum lycopersicum* L. cultivadas en invernaderos, se siguió la metodología propuesta por (INTAGRI, 2020). De cada columna del invernadero, se seleccionaron al azar dos plantas. De

cada una de estas plantas, se recolectaron dos hojas maduras, también seleccionadas aleatoriamente, específicamente de la parte media. La recolección se realizó en las primeras horas de la mañana y antes del riego, con el objetivo de obtener muestras óptimas. Solo se incluyeron hojas sanas y sin daños visibles para garantizar la calidad de las muestras.

Las hojas recolectadas fueron almacenadas en fundas de plástico y transportadas en un cooler para preservar su integridad durante el traslado al laboratorio. El análisis se realizó en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca. Para la extracción del jugo, se separaron los pecíolos de las láminas foliares y se trozaron en fragmentos de 1 a 2 cm. Luego, mediante una prensa manual, se extrajo el jugo de los pecíolos para su análisis de N, P, K, pH y CE, en un tiempo máximo de dos minutos tras la extracción para evitar alteraciones en los resultados.



Figura 5. Extracción de savia de pecíolos mediante prensa manual durante el muestreo en invernadero

Fuente: Brito & Cabrera (2025).

Finalmente, los resultados obtenidos se compararon con los niveles de referencia establecidos para el cultivo, permitiendo determinar si los valores eran adecuados, deficientes o excesivos para el crecimiento saludable de las plantas.

4.6 Metodología para el objetivo específico 2: “Determinar la relación entre los niveles de nutrientes en la savia del pecíolo y los niveles presentes en el suelo”

Para determinar la relación entre los niveles de nutrientes en la savia del pecíolo y los niveles presentes en el suelo, se realizó un muestreo representativo en el invernadero. Se tomaron cuatro muestras de suelo en total por invernadero, obtenidas a partir de submuestras recolectadas en cada planta de la cual se extrajeron hojas para el análisis de savia. Cada submuestra se combinó para formar una única muestra compuesta por fila, siguiendo la metodología propuesta por Díaz y Hunter. De cada invernadero se realizó el muestreo de densidad aparente, para lo cual se tomaron dos muestras por fila, una al inicio y otra al final.

Las muestras de suelo fueron enviadas al laboratorio Agrobiolab, donde se realizó la determinación de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Por otro lado, en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca, se analizaron los parámetros de pH, conductividad eléctrica (CE), densidad aparente (DA) y materia orgánica (MO).

Finalmente, los datos obtenidos tanto de suelo y savia fueron comparados para identificar las correlaciones entre la disponibilidad de nutrientes en el suelo y su absorción por parte de las plantas.

4.7 Análisis de datos

Para el análisis de datos del primer objetivo se realizó un análisis descriptivo de los nutrientes de la savia, se calcularon las medias y desviaciones estándar, dichos valores permitieron identificar posibles deficiencias nutricionales al compararlos con los rangos óptimos ya establecidos para el cultivo.

Por otro lado, para el segundo objetivo lo primero que se hizo fue verificar la normalidad de los datos utilizando la prueba de Shapiro-Wilk, para las variables que se encontraban dentro de los rangos adecuados según el estado del arte, se calcularon intervalos de confianza al 95%, y para las variables que no presentaron un comportamiento normal, se utilizaron percentiles 2.5 y 97.5 como referencia. Finalmente, para evaluar la relación entre variables, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson para los datos que fueron normales, y el coeficiente de correlación de Spearman para aquellos que no cumplieron con la normalidad.

5. Resultados

5.1 Resultados para el objetivo 1.

5.1.1 Análisis general de los niveles de nutrientes en la savia del pecíolo en los invernaderos evaluados

Al comparar los valores promedios obtenidos de los nutrientes de la savia con los rangos óptimos con los rangos óptimos sugeridos por Hochmuth (1994) se identifican posibles deficiencias y excesos nutricionales. El contenido de N (580,1) se encontró dentro del rango óptimo sugerido (400-600), lo que sugiere que se encuentra en un rango adecuado. En cuanto al fósforo presentó un valor medio de 162,83 siendo ligeramente inferior al rango óptimo 176 lo que podría indicar una leve deficiencia. Por otro lado, el potasio mostró una concentración media de 5916,66 valor que supera considerablemente el rango óptimo (3000-3500), indicando un posible exceso de nutrientes.

Tabla 6. Concentraciones de nutrientes en la savia y rangos óptimos de referencia para *Solanum lycopersicum L.*

Variable	Media observada	Rango óptimo (referencia)
N savia	580,1 ppm	400-600
P savia	162,83 ppm	176
K savia	5916,66 ppm	3000-3500

Fuente: Adaptado de Hochmuth (1994).

Elaborado: Brito & Cabrera (2025).

5.1.2 Análisis individual de nutrientes por invernadero y fase de desarrollo

En la Tabla 7 se evidencian los valores promedios de los nutrientes obtenidos para cada invernadero, diferenciados según su el estado fenológico del cultivo, basados en los rangos óptimos establecidos por Hochmuth (1994). En el invernadero MS1, que se encontraba en fase de cosecha, se observa que el valor promedio de nitrógeno (N) en la savia fue de 153,60 ppm, lo cual se encuentra por debajo del rango óptimo de 200–400 ppm, indicando una

deficiencia de nitrógeno durante esta etapa final del desarrollo del cultivo. En el caso del fósforo (P), el valor observado fue de 125 ppm, también inferior al rango óptimo de 176 ppm, lo que evidencia una deficiencia de fósforo en la etapa de cosecha. Por otro lado, el potasio (K) registró un valor de 3925 ppm, situándose por encima del rango óptimo de 2000–2500 ppm, lo que sugiere un exceso de potasio en la savia en esta fase fenológica.

En cuanto al invernadero MS2, en fase de fructificación, los niveles de nitrógeno en la savia fueron de 784,96 ppm, superando el rango óptimo de 400–600 ppm, lo que indica un exceso de nitrógeno en esta etapa del cultivo. Por otro lado, el fósforo presentó valores de 174 ppm, encontrándose ligeramente por debajo del rango establecido de 176 ppm, lo cual indica una ligera deficiencia. En cambio, el potasio presentó valores de 7450 ppm, situándose muy por encima del rango óptimo de 3000–3500 ppm, evidenciando un exceso considerable durante la fructificación.

Finalmente, para el invernadero MS3, en fase de crecimiento vegetativo, los niveles de nitrógeno fueron de 801,89 ppm, encontrándose por encima del rango óptimo y mostrando un exceso en esta etapa inicial. El fósforo, con 189,5 ppm, también se encontró por encima del rango óptimo de 176 ppm, indicando un exceso de fósforo. El potasio, con 6375 ppm, superó el rango ideal de 3500–4000 ppm, lo que sugiere igualmente un exceso de potasio durante el crecimiento vegetativo.

Tabla 7. Concentraciones de nutrientes en la savia por invernadero y rangos óptimos de referencia para *Solanum lycopersicum* L.

Inv	Estado fenológico	N (ppm)	Rangos óptimos	P (ppm)	Rangos óptimos	K (ppm)	Rangos óptimos
MS1	Cosecha	153,60	200-400	125,0	176	3925	2000-2500
MS2	Fructificación	784,96	400-600	174,0	176	7450	3000-3500
MS3	Crecimiento vegetativo	801,89	1000-1200	189,5	176	6375	3500-4000

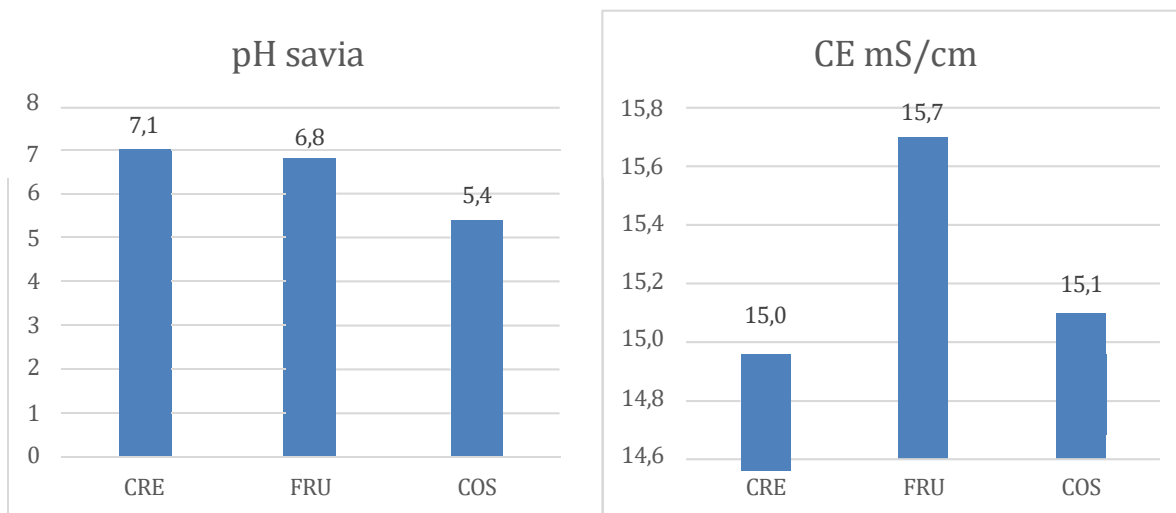
Fuente: Adaptado de Hochmuth (1994),

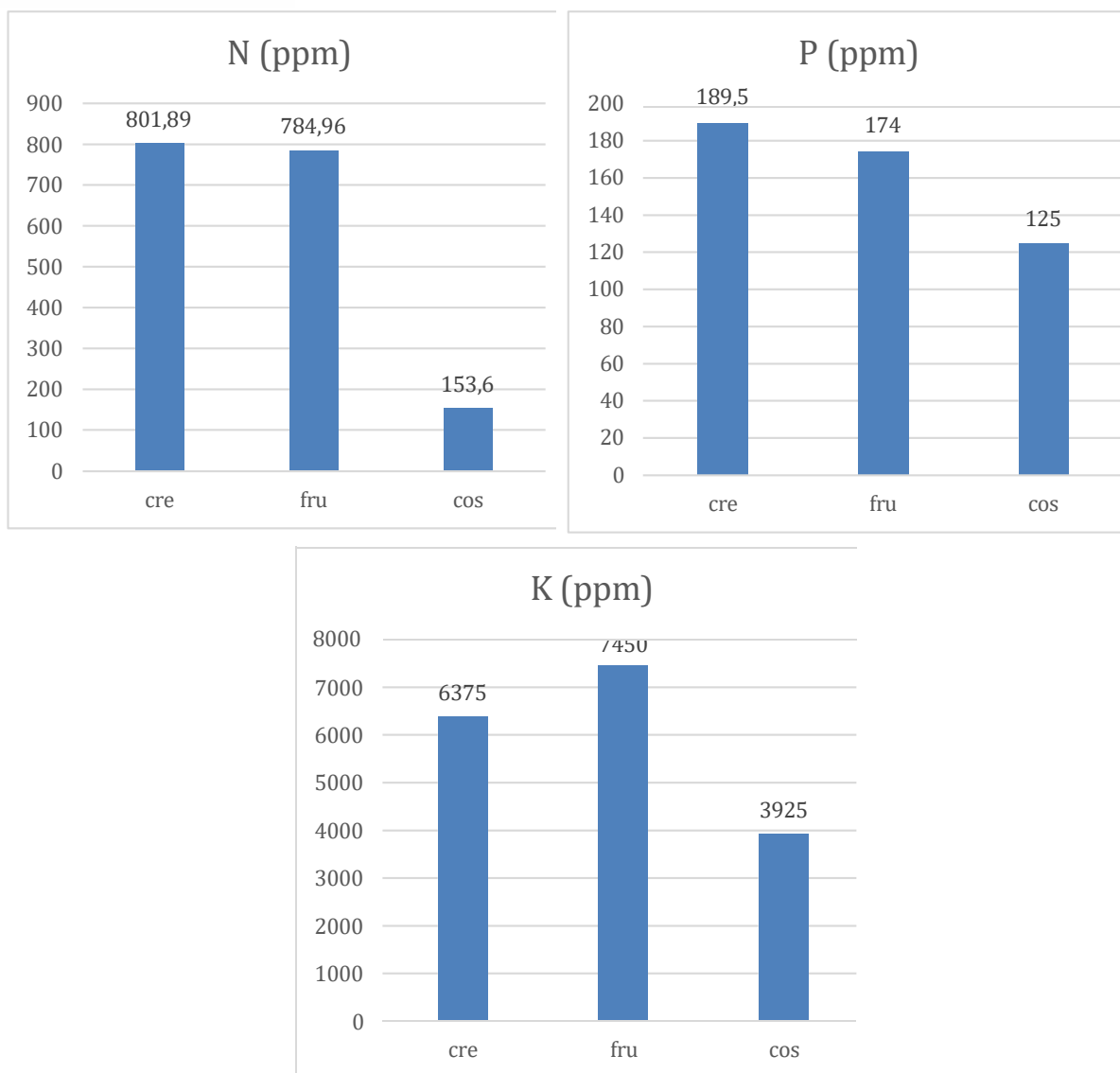
Elaborado: Brito & Cabrera (2025).

Como se observa en la Tabla 7 los niveles de nutrientes en la savia del pecíolo varían significativamente en función del estado fenológico del cultivo. En la fase de crecimiento

vegetativo (MS3), se presentan las mayores concentraciones de nitrógeno (801,89 ppm), fósforo (189,5 ppm) y potasio (6375 ppm), evidenciando una alta demanda y acumulación de nutrientes en esta etapa inicial. En la fase de fructificación (MS2), los valores comienzan a disminuir ligeramente, aunque en el caso del potasio aún se mantienen excesivos (7450 ppm). Finalmente, en la etapa de cosecha (MS1), se observa una disminución marcada en los niveles de todos los nutrientes, especialmente de nitrógeno (153,60 ppm) y fósforo (125 ppm), lo cual puede estar relacionado con la movilización de estos elementos hacia los frutos y el desgaste natural de la planta.

En la Figura 6 el Nitrógeno y el fosforo, presentaron mayor contenido en la savia de planta en la etapa de crecimiento, según avanza las etapas fenológicas esta disminuye (fructificación), y en la etapa de cosecha estas disminuyen notablemente. Comportamiento similar presentó el pH, que fue más elevado en crecimiento (pH 7,1), donde necesita mayor absorción de nutrientes, y disminuyo en fructificación (pH 6,8), y bastante menos en la etapa de cosecha (pH 5,4)





Nota: cre: etapa de crecimiento (MS3), fru: etapa de fructificación (MS2), cos: etapa de cosecha (MS1).

Figura 6. Comportamiento de parámetros nutricionales en la savia (peciolo) en la planta tomate en diferentes etapas fenológicas

Elaborado: Brito & Cabrera (2025).

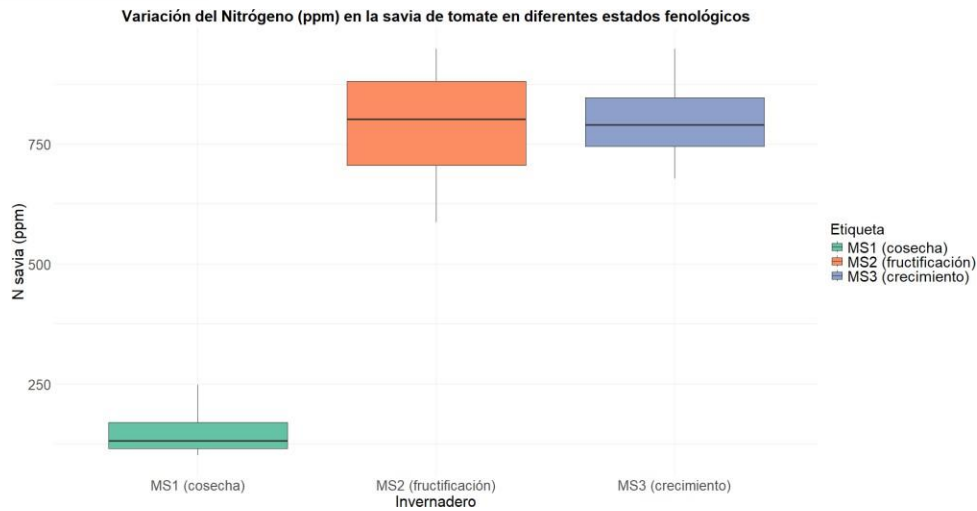


Figura 7. Variación de nitrógeno(N) en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)

La Figura 7 muestra la variación en la concentración de nitrógeno en la savia de tomate en tres momentos distintos del ciclo fenológico: crecimiento (MS3), fructificación (MS2) y cosecha (MS1). Se observa una disminución progresiva en los niveles de nitrógeno a medida que avanza el desarrollo del cultivo, con los valores más altos durante el crecimiento y fructificación, y los más bajos en la etapa de cosecha. Esta tendencia refleja el cambio en la demanda nutricional de la planta según su estado.

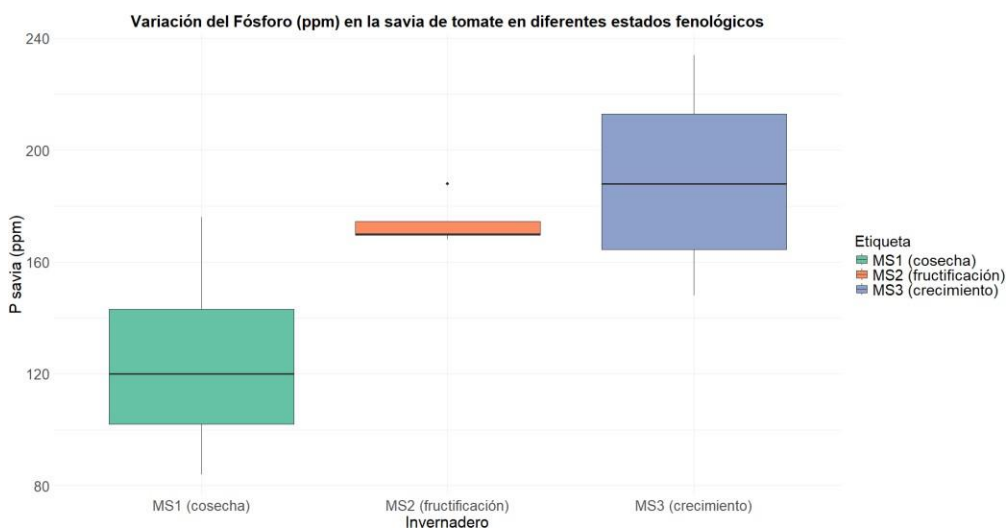


Figura 8. Variación de fósforo (P) en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)

La Figura 8 muestra la variación en la concentración de fósforo en la savia de tomate durante tres fases fenológicas: crecimiento (MS3), fructificación (MS2) y cosecha (MS1). Se observa que, en general, los valores de fósforo tienden a disminuir a medida que avanza el ciclo del cultivo. Durante la etapa de crecimiento (MS3) se registraron las concentraciones más altas, mientras que en la etapa de cosecha (MS1) los valores fueron considerablemente menores y con mayor dispersión. En la fase de fructificación (MS2), las concentraciones se ubicaron en un rango intermedio con menor variabilidad y un dato atípico ligeramente por encima del rango. Estos patrones reflejan la dinámica de absorción y demanda de fósforo según el estado fisiológico de la planta, y deben ser interpretados con base en los estándares establecidos para cada etapa fenológica.

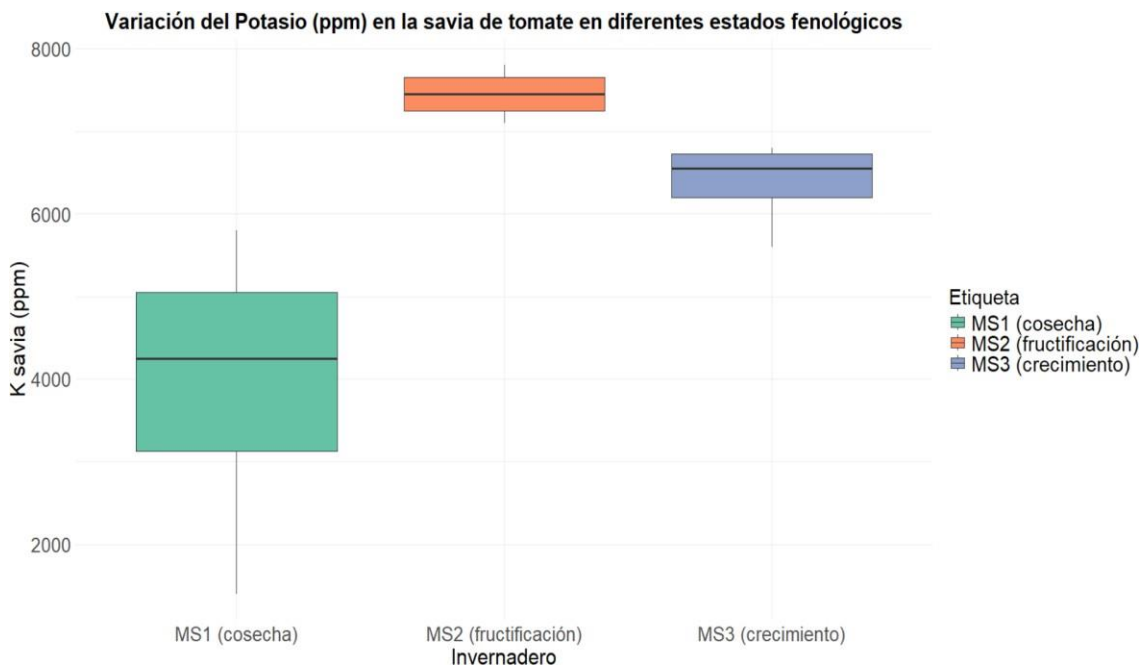


Figura 9. Variación de Potasio (K) en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)

La Figura 9 muestra la variación en la concentración de potasio en la savia de tomate durante tres etapas fenológicas: crecimiento (MS3), fructificación (MS2) y cosecha (MS1). Se observa una tendencia general en la que los niveles de potasio son más altos durante la fructificación, seguidos por la fase de crecimiento, y alcanzan sus valores más bajos en la etapa de cosecha. Además, la dispersión de los datos es mayor en la fase de cosecha y más reducida durante

la fructificación, lo cual podría estar asociado a la estabilidad de la demanda nutricional en esa fase.

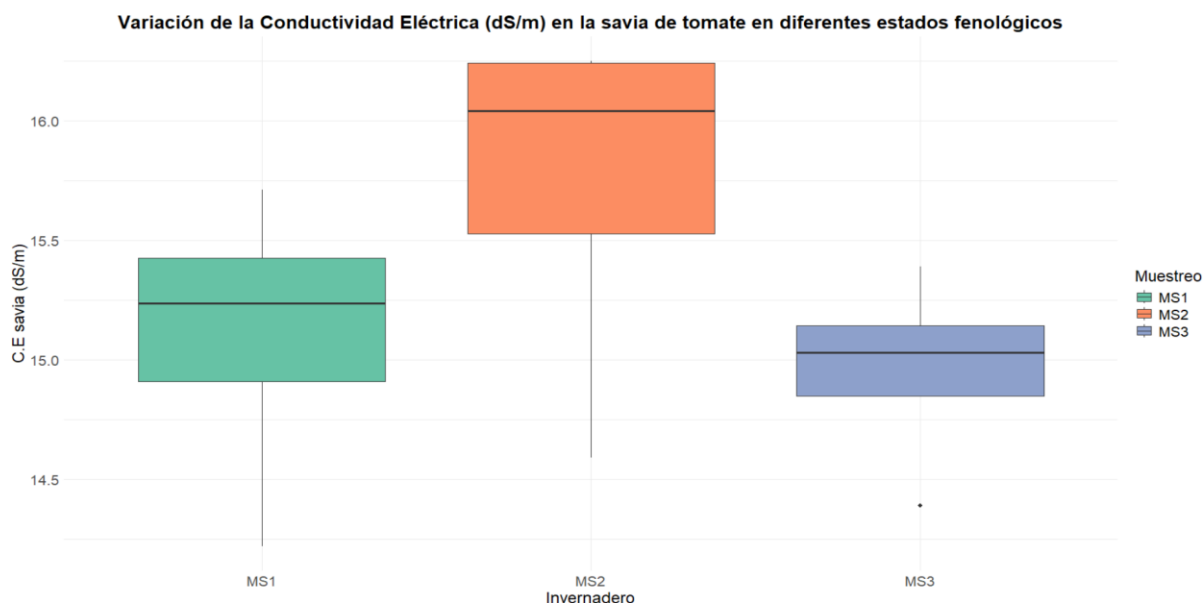


Figura 10. Variación de conductividad eléctrica (CE) en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)

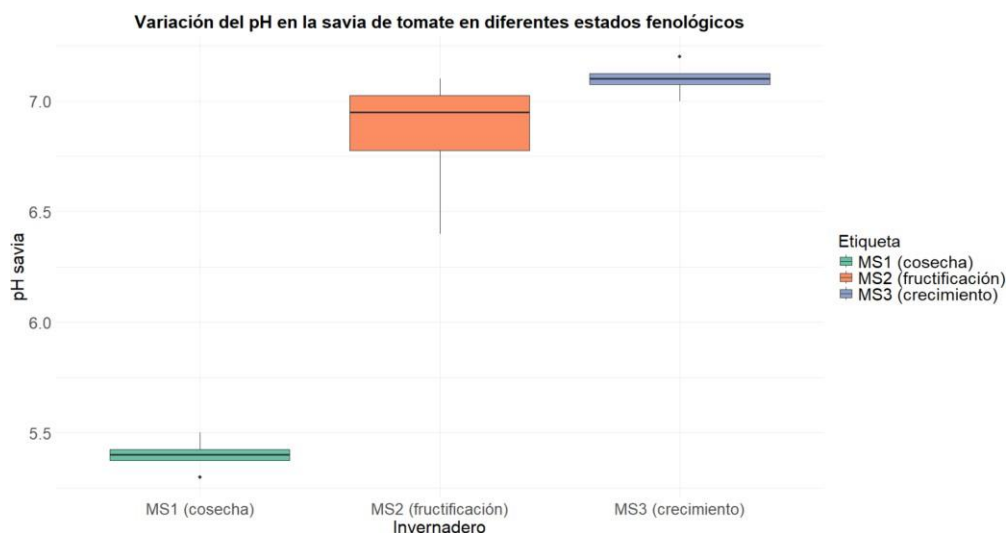


Figura 11. Variación de pH en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)

La Figura 10 muestra la variación de la conductividad eléctrica según el estado fenológico del cultivo. Los valores más elevados se registran durante la fase de fructificación, seguidos por

la etapa de cosecha, mientras que los niveles más bajos se observan en la fase de crecimiento. Esta tendencia puede estar asociada a una mayor concentración de solutos en la savia durante las fases de mayor demanda metabólica y translocación de nutrientes.

La Figura 11 muestra la variación del pH en la savia de tomate a lo largo de los diferentes estados fenológicos del cultivo. Se observa un valor más bajo de pH durante la fase de cosecha (MS1), mientras que durante las etapas de fructificación (MS2) y crecimiento (MS3) los valores son más elevados y relativamente estables. Estos cambios pueden reflejar ajustes fisiológicos relacionados con la absorción y transporte de nutrientes en cada etapa de desarrollo.

5.2 Resultados para el objetivo 2.

Para cumplir el objetivo 2, se realizaron los análisis de los suelos de los invernaderos estudiados, en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo, con el propósito de evidenciar las posibles relaciones entre los nutrientes del suelo y la savia de los peciolo circulante en las plantas de tomate.

Tabla 8. Prueba de normalidad Shapiro-Wilk para las diferentes variables analizadas

Nutriente	p-value	W.W
N savia	0.0343	0.8475
P savia	0.7636	0.9586
K savia	0.0535	0.8631
C.E savia	0.7533	0.9579
pH savia	0.0033	0.7593
N suelo	0.0435	0.8560
P suelo	0.4716	0.9379
K suelo	0.1862	0.9054
C.E suelo	0.9882	0.9813
pH suelo	0.2823	0.9196

Nota: P-value > 0.05 indica normalidad, y W.W es el estadístico de la prueba de Shapiro-Wilk para evaluar dicha normalidad.

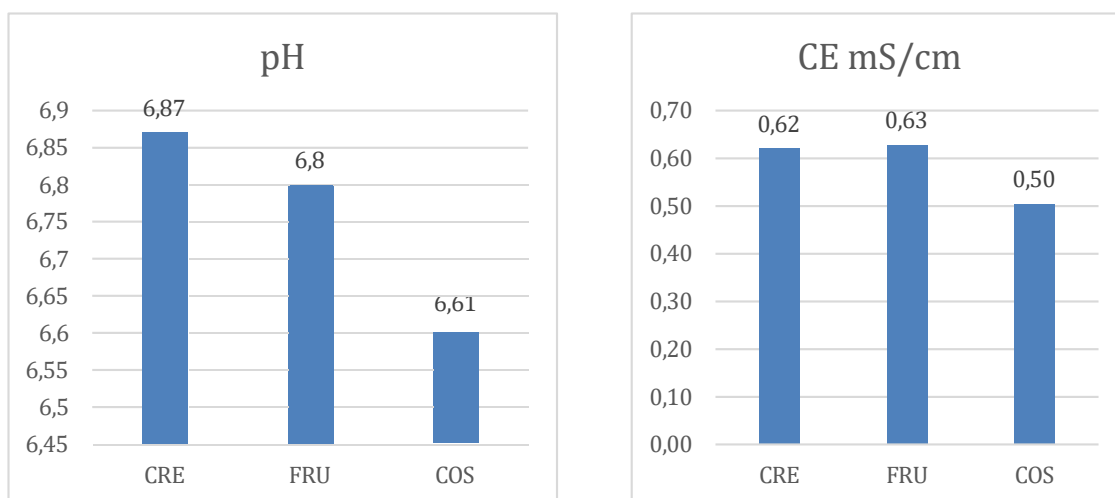
Fuente: Brito & Cabrera (2025).

Dado que la savia del pecíolo es un indicador directo del estado nutricional de las plantas, estudiar esta relación permite entender cómo los nutrientes en el suelo se reflejan en el desarrollo de la planta, lo que nos ayuda a entender su estado nutricional, y optar por posibles ajustes de las prácticas de fertilización.

En la Tabla 8 se puede evidenciar que según los resultados obtenidos en la prueba de Shapiro-Wilks, las variables P savia, C.E savia, P suelo, K suelo, C.E suelo y pH suelo seguían una distribución normal ($p > 0,05$), mientras que las variables N savia, pH savia, N suelo, K savia no siguen una distribución normal, por lo cual para el análisis se utilizaron métodos estadísticos paramétricos y no paramétricos.

Como se explicó en párrafos anteriores, se pudo observar que el N, P y K, en la etapa de crecimiento se presentó con mayores valores que en la etapa de fructificación (MS2) y un tanto menor en la etapa de cosecha (MS1).

En el Figura 12 en relación a los macronutrientes N_P_K, se puede observar, que el nitrógeno presenta mayor contenido en el suelo en la etapa de crecimiento, lo que da para intuir que la planta requiere más de este nutriente en esta etapa. Esta tendencia se presenta también en los resultados del Nitrógeno en el contenido en la savia del pecíolo (Figura 6), que es más alto en la etapa de crecimiento y con el pH en savia que tiende a la neutralidad (Figura 6).



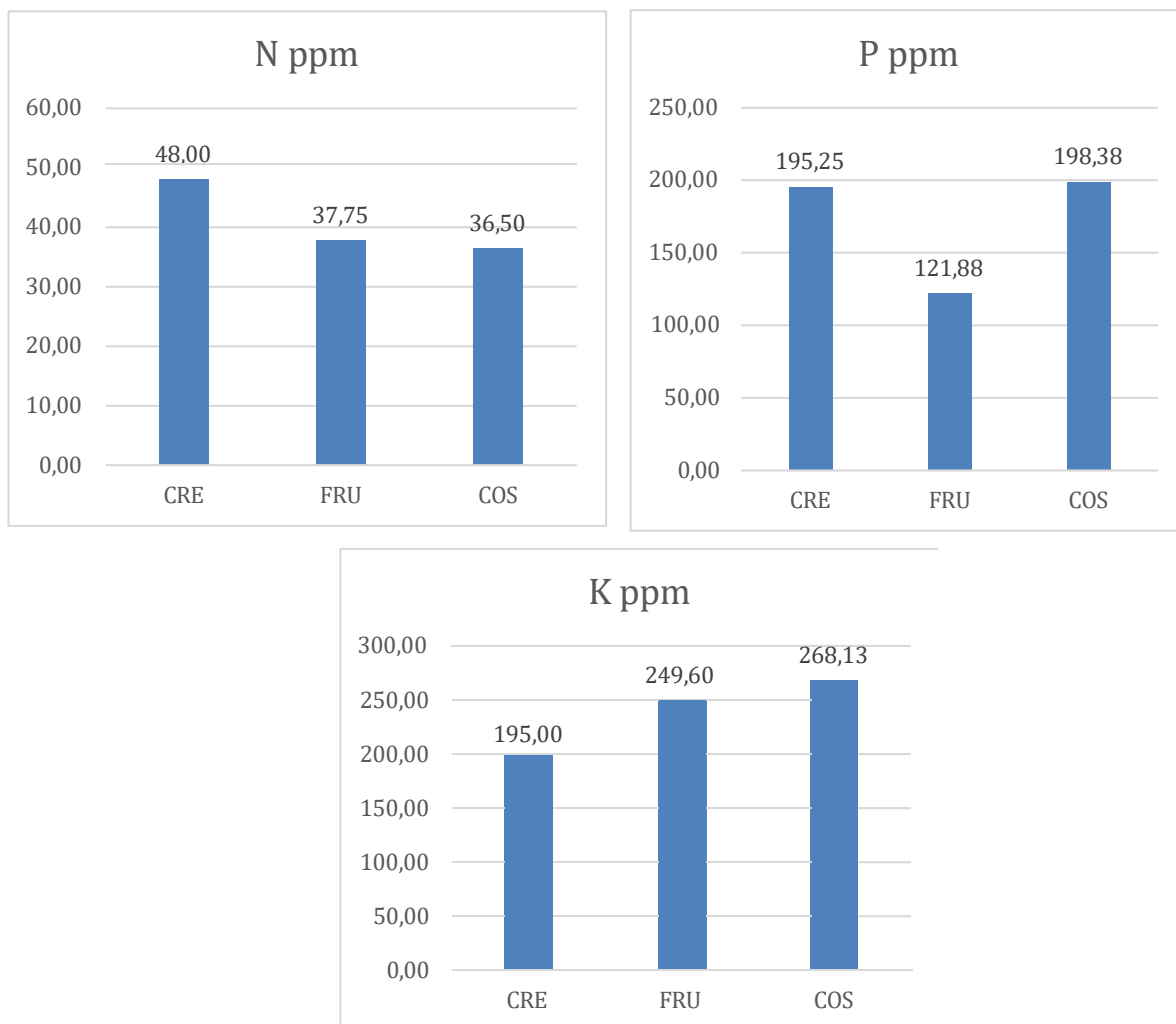


Figura 12. Comportamiento de las diferentes variables del suelo en etapas fenológicas del tomate (*Solanum lycopersicum L*)

Fuente: Brito & Cabrera (2025)

En cuanto al pH del suelo sabemos que su acidez o alcalinidad influyen en la absorción de nutrientes. En los resultados obtenidos en relación a este parámetro se observó que el pH en la etapa de crecimiento fue mayor (pH 6,87), que en fructificación (pH 6,8) y en cosecha más bajo que los anteriores (pH 6,61). Este comportamiento fue similar en la savia del peciolo de las plantas en las diferentes etapas fenológicas (pH 7,10. pH 6,8. pH 5,4), respectivamente.

En relación a la CE del suelo, prácticamente no existe variación en Crecimiento y fructificación, se nota un ligero decremento en el contenido de CE en el suelo en la época de cosecha (Figura 12).

En lo que corresponde al nutriente fósforo (P), se registraron valores mayores en crecimiento y cosecha (195,25 ppm y 198,38 ppm) respectivamente, y en la fructificación este parámetro fue menor (121,88 ppm) (figura 12)

En lo referente al macronutriente potasio (K), se registraron valores crecientes en los suelos en las diferentes etapas fenológicas, crecimiento 195 ppm, fructificación 249,60 ppm y en la cosecha 268,13 ppm.

Tabla 9. *Correlación entre las variables de nutrientes en savia del peciolo de las plantas y en el suelo*

Variabes	Correlación	p-value
N savia - N suelo	0,584	0,0462
P savia - P suelo	-0,089	0,7827
K savia - K suelo	0,190	0,5534
C.E savia - C.E suelo	0,173	0,5900
pH savia - pH suelo	0,417	0,1778

Fuente: Brito & Cabrera (2025).

En la Tabla 9, en el análisis de correlación de los nutrientes, pH y CE, se evidencia una única relación estadísticamente significativa, entre el nitrógeno (N) savia del peciolo y nitrógeno (N) en el suelo ($r = 0,584$, $p = 0,0462$). Para el resto de variables no se encontró correlaciones significativas, aunque existen tendencias que van con las etapas fenológicas (mayor presencia de nutrientes en crecimiento, disminuyen en fructificación, y más bajas en cosecha, donde la planta ya concluida su función fisiológica). Esto indica que en términos estadísticos los niveles de nutrientes existentes en la savia no dependen directamente de los niveles en el suelo.

Con relación al pH tanto del suelo como de la savia de peciolo, hay una tendencia decreciente desde la etapa de crecimiento hasta la cosecha, tanto en suelo como en savia del peciolo. La CE, no presentó un comportamiento similar, más bien en la savia del peciolo fue mayor en fructificación, ya que la planta requiere de mayor contenido de sales para la formación de frutos; en el suelo la CE presentó una tendencia similar al pH del suelo.

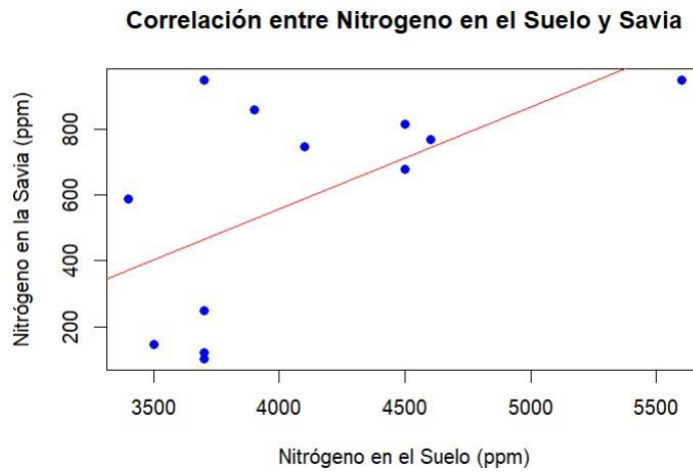


Figura 13. Correlación entre las concentraciones de nitrógeno (N) en el suelo y en la savia de *Solanum lycopersicum* L.

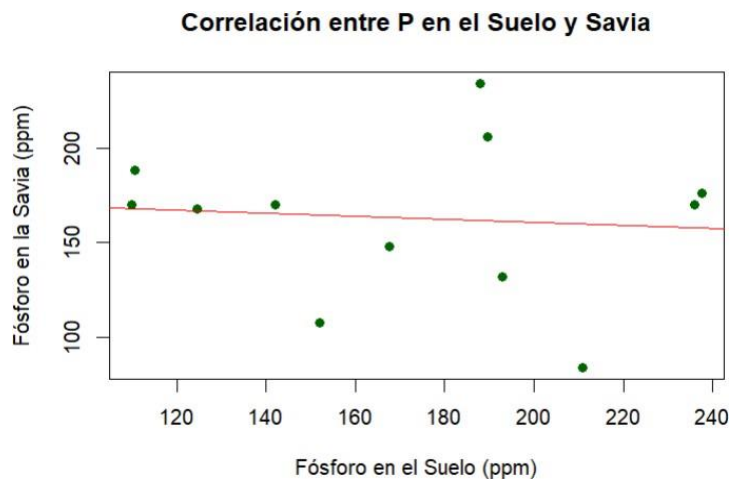


Figura 14. Correlación entre las concentraciones de fósforo (P) en el suelo y en la savia de *Solanum lycopersicum* L.

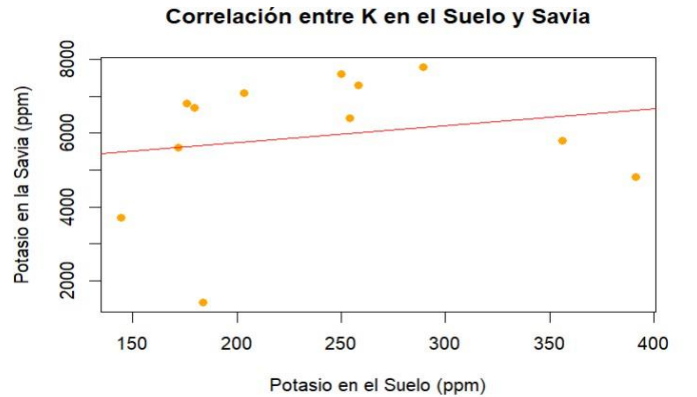


Figura 15. Correlación entre las concentraciones de potasio (K) en el suelo y en la savia de *Solanum lycopersicum* L.

De acuerdo a la Figura 15, entre la relación del contenido de nutrientes de la savia y el suelo, la línea de tendencia evidencia una relación positiva moderada, esto indica que, a mayor concentración de nitrógeno existente en el suelo, también se observa un incremento en los niveles de nitrógeno en la savia, cabe destacar que la dispersión de los puntos también sugiere que la relación no es completamente consistentemente fuerte, ya que las muestras no siguen un patrón claramente definido.

Para el fósforo se observa en la figura una tendencia negativa, lo cual implica que en algunos casos un mayor contenido de fósforo en el suelo no se traduce exactamente en una mayor concentración en el contenido de savia. Esta baja correlación puede deberse a las propiedades propias del fósforo.

En cuanto al potasio, la relación entre suelo y savia presenta una tendencia ligeramente positiva, aunque con una dispersión notable de los datos. Esto sugiere que si bien existe cierta correlación entre dichos niveles no se trata exactamente de una relación fuerte.

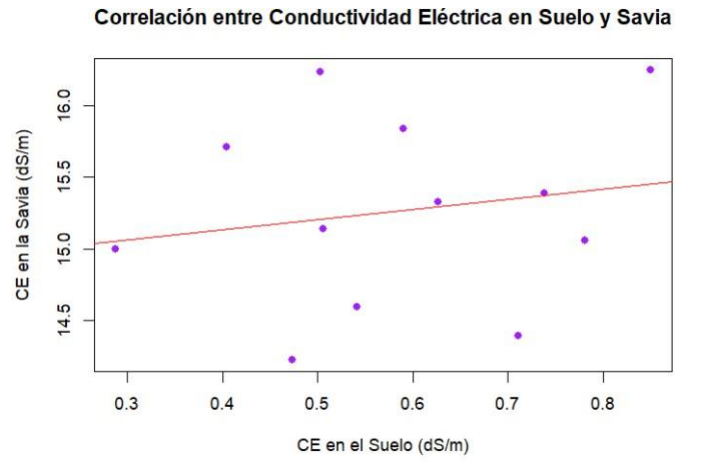


Figura 16. Correlación entre los valores de conductividad eléctrica (CE) en el suelo y en la savia de *Solanum lycopersicum* L.

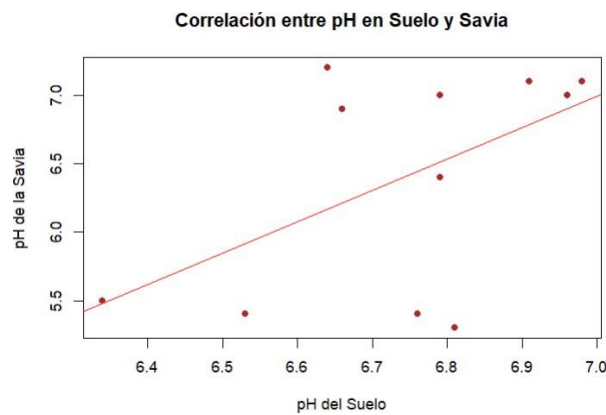


Figura 17. Correlación entre el pH del suelo y de la savia de *Solanum lycopersicum* L.

En la Figura 17 de correlación entre la CE del suelo y de la savia, se muestra una correlación positiva no significativa, la dispersión de los datos observados no evidencia una tendencia clara, además que la línea de tendencia es casi horizontal, lo que indica que la conductividad eléctrica no se refleja de manera directa en la savia. En cuanto a la relación entre el pH del suelo y el de la savia el gráfico muestra una tendencia ascendente. Aunque no se trata de una relación completamente fuerte se puede notar una mayor coherencia entre los valores de ambas variables. Esto sugiere que el pH del suelo si podría influir en cierta manera sobre el pH de la savia, aunque no de manera determinante.

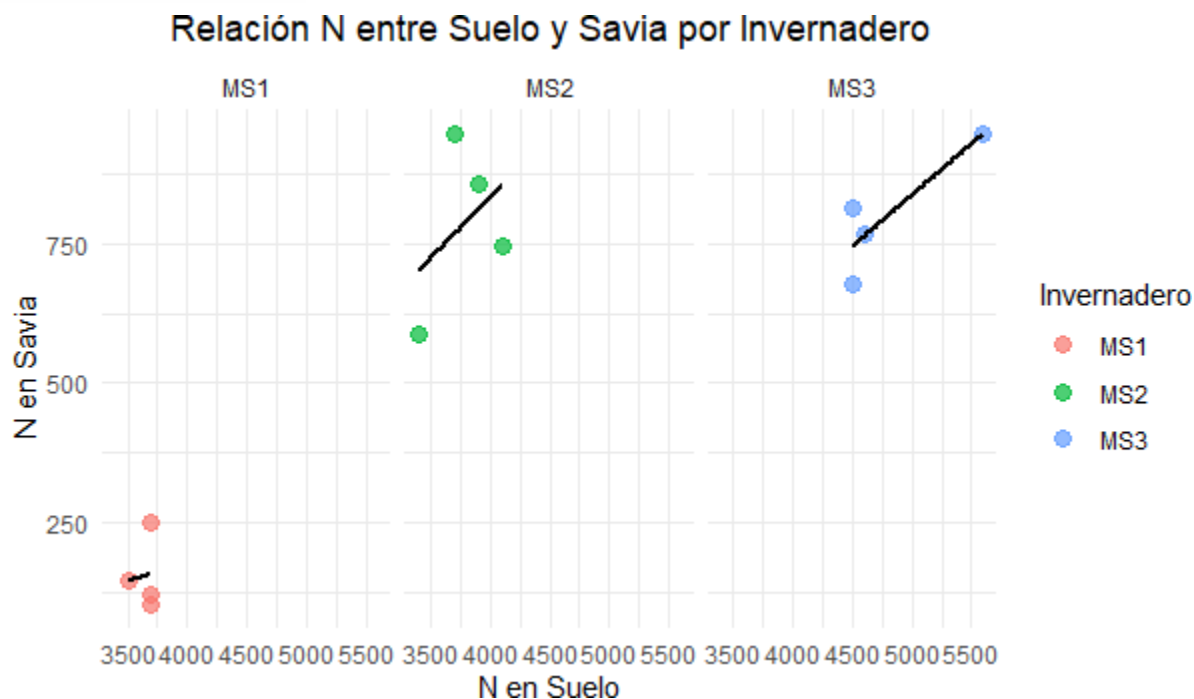


Figura 18. Correlación entre las concentraciones de nitrógeno(N) en el suelo y en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)

En la Figura 18 se evidencia la relación entre el contenido de nitrógeno en el suelo y savia de los tres invernaderos, en el invernadero MS1 que se encontraba en etapa de cosecha las correlaciones fueron negativas y débiles. Esto indica que no hubo una asociación clara entre los niveles de nutrientes del suelo y la concentración en la savia

En el invernadero MS2 en fase de fructificación la correlación fue positiva pero débil y no resultó significativamente. Esto indica que, si bien podría existir una ligera tendencia a que el aumento del nitrógeno en el suelo se refleje en la savia, la relación no es suficientemente consistente ni fuerte como para determinar una relación entre ambas variables.

El invernadero MS3 en etapa de crecimiento vegetativo se observó una correlación moderadamente positiva, esta relación sugiere que el N de la savia y el suelo están relacionados.

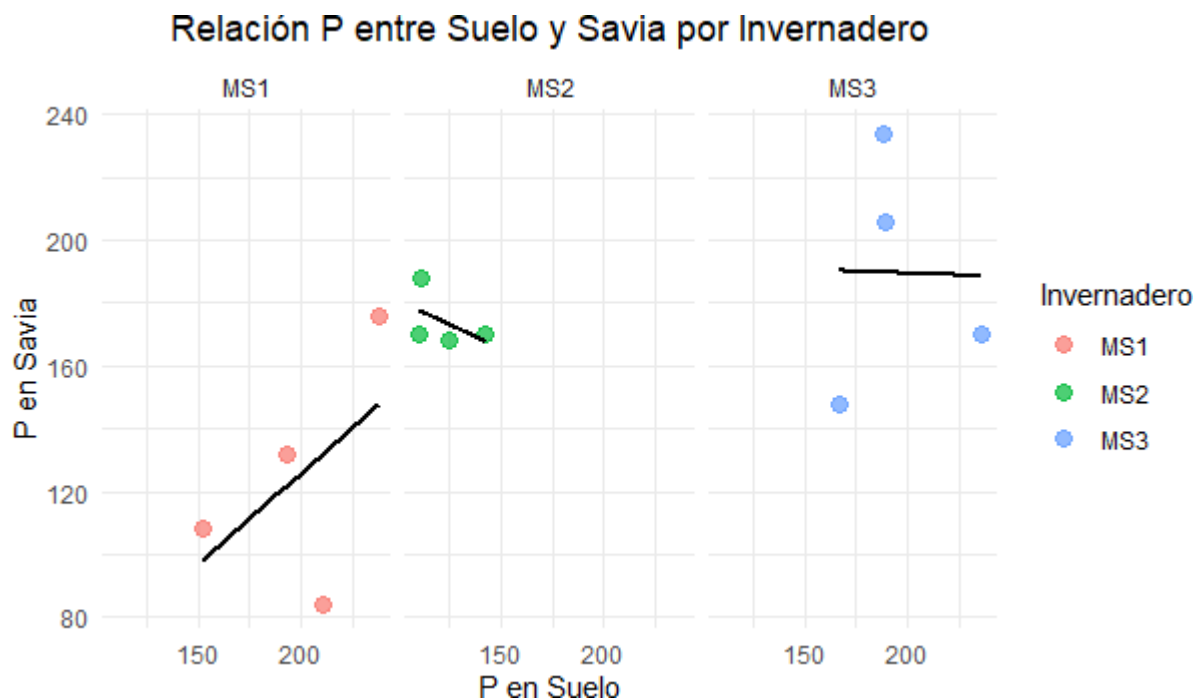


Figura 19. Correlación entre las concentraciones de fósforo (P) en el suelo y en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)

La Figura 19 muestra la relación entre fósforo presente en el suelo y la savia varían entre los 3 invernaderos evaluados. Esto indica que no se puede establecer una relación general sin considerar las condiciones de un invernadero en específico. Se puede observar que en el MS1 hay una línea de tendencia que tiene pendiente positiva, esto quiere decir, a mayor fósforo en el suelo mayor fósforo en la savia.

Por otra parte, el MS2 y MS3 no denotan una relación evidente, ya que, en el MS2 la pendiente es ligeramente negativa, lo cual puede indicar que el fósforo existente en el suelo no influye directamente en el fósforo de la savia, asimismo, en el MS3 prácticamente no existe una pendiente, o esta es casi cero o ligeramente negativa, sugiriendo que no hay relación entre el fósforo del suelo ni de la savia.

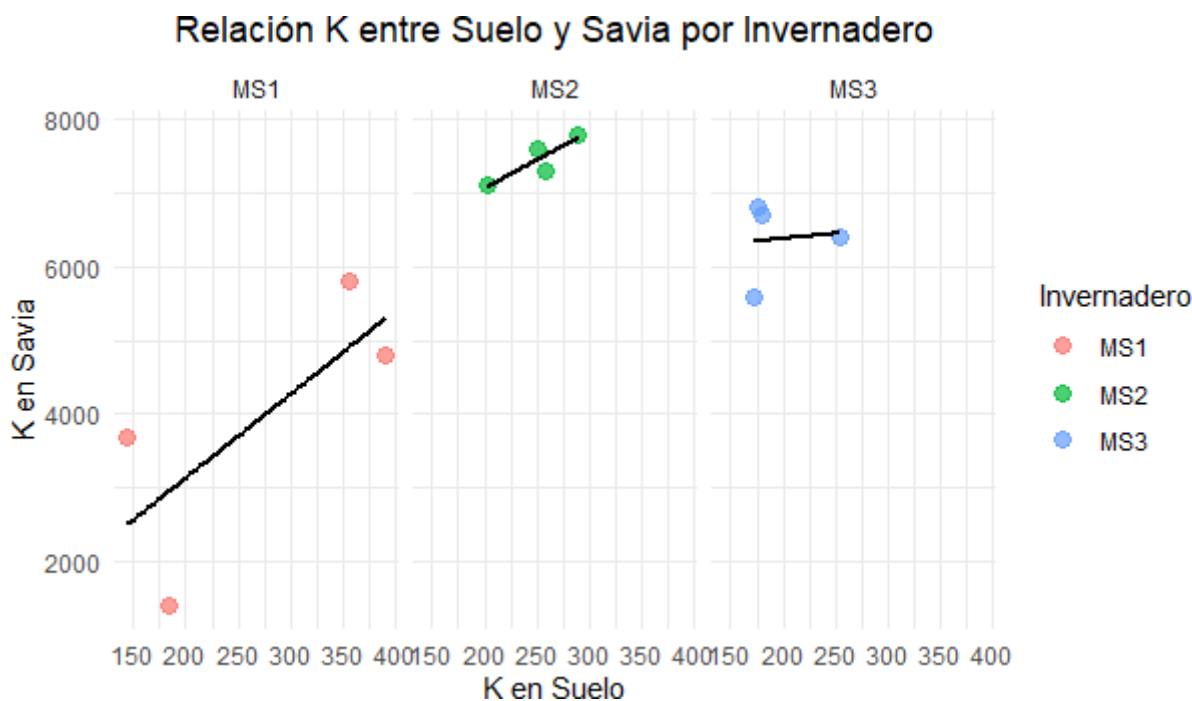


Figura 20. Correlación entre las concentraciones de potasio(P) en el suelo y en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)

En la Figura 20 se puede observar la relación existente entre el potasio de los tres invernaderos de estudio. En el MS1 existe una línea de tendencia creciente, por lo tanto, tiene una relación positiva fuerte, sugiriendo que, a mayor contenido de potasio en el suelo, mayor será la absorción en la savia. MS2 contiene niveles más altos y estables en ambas variables, reflejando una mejor capacidad de absorción del nutriente. MS3 también muestra valores intermedios o altos y una relación positiva, pero la pendiente es menor, lo que podría indicar que existe una respuesta más deficiente del cultivo al fósforo del suelo.

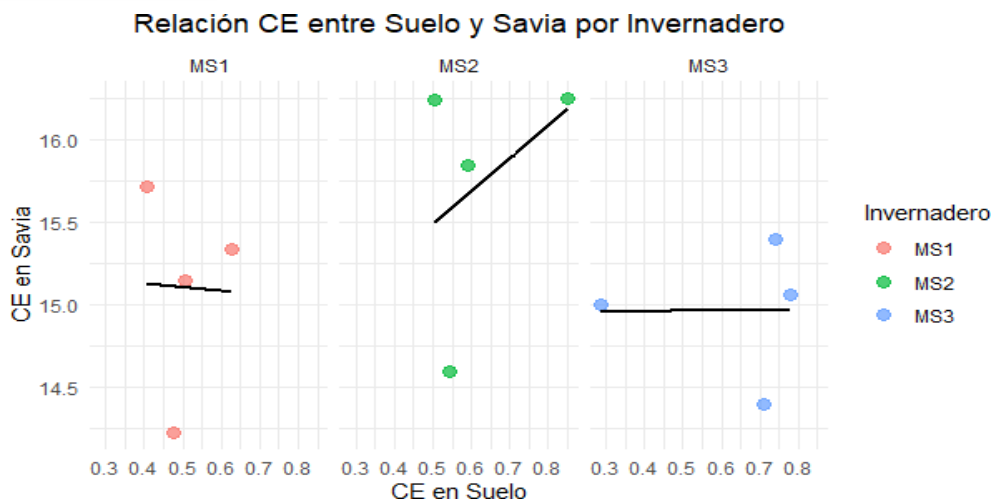


Figura 21. Correlación entre las concentraciones de conductividad eléctrica (CE) en el suelo y en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)

En la Figura 21 de conductividad eléctrica los resultados por invernadero mostraron correlaciones débiles y no significativas. Para el invernadero MS1 la correlación fue nula, indicando que no hay asociación entre el suelo y la savia. En el MS2 se observó una correlación positiva moderada, esto indica que existe una leve tendencia a que un aumento en la concentración de sales en el suelo se refleje en la savia. Por su parte, en el MS3 la correlación también fue positiva moderada indicando una mayor coherencia entre ambos parámetros. Sin embargo, en ambos casos MS2 y MS3 los resultados no fueron estadísticamente significativos, por lo cual no se puede asegurar con certeza que exista una relación lineal entre ambas variables

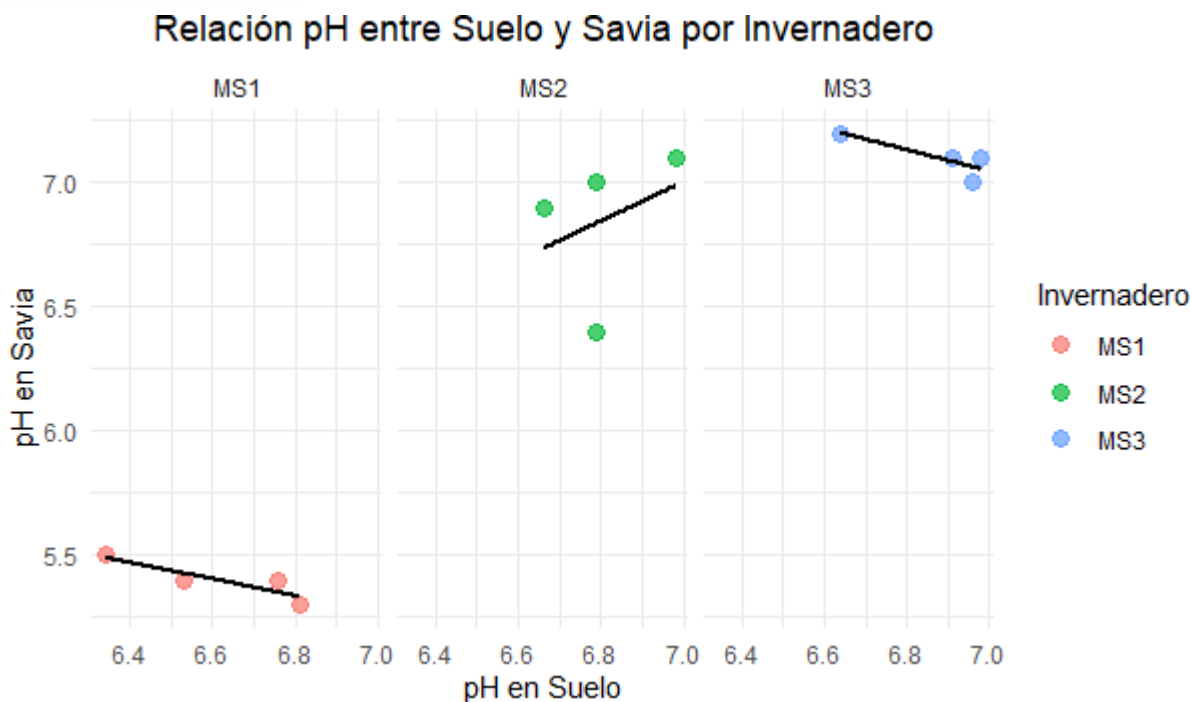


Figura 22. Correlación entre las concentraciones de pH en el suelo y en la savia de invernaderos en cosecha (MS1), fructificación (MS2), y crecimiento vegetativo (MS3)

La Figura 22 presenta la relación existente entre el pH del suelo y el de la savia en los tres invernaderos (MS1, MS2, MS3), en donde se puede observar tendencias distintas para cada caso. En MS1 hay una tendencia negativa con valores bajos en cuanto al pH de la savia, es decir, mientras el pH del suelo aumenta, el de la savia disminuye, esto sugiere una posible interferencia en la absorción del pH interno. MS2 contiene valores altos de pH de la savia y del suelo, por lo tanto, existe una relación positiva entre ambas variables, sugiriendo que existe una relación directa y estable. Asimismo, MS3 también muestra valores altos y similares, pero presenta una línea de tendencia negativa, lo cual puede reflejar una respuesta distinta entre el cultivo y las condiciones del suelo.

Tabla 10. *Correlación entre las variables de nutrientes en savia y suelo en tres invernaderos con diferentes estados fenológicos*

Parámetro	Invernadero	r	p-value
N	MS1 (Cosecha)	-0,258	0,7418
P	MS1 (Cosecha)	0,527	0,4729
K	MS1 (Cosecha)	0,737	0,2626
CE	MS1 (Cosecha)	-0,032	0,9681
pH	MS1 (Cosecha)	-0,883	0,1174
N	MS2 (Fructificación)	0,417	0,5833
P	MS2 (Fructificación)	-0,316	0,6838
K	MS2 (Fructificación)	0,873	0,1274
CE	MS2 (Fructificación)	0,398	0,602
pH	MS2 (Fructificación)	0,334	0,6664
N	MS3 (Crecimiento vegetativo)	0,632	0,3675
P	MS3 (Crecimiento vegetativo)	-0.018	0.9817
K	MS3 (Crecimiento vegetativo)	0.2	0.9167
CE	MS3 (Crecimiento vegetativo)	0.6	0.4167
pH	MS3 (Crecimiento vegetativo)	-0.828	0.172

Fuente: Brito & Cabrera (2025).

En la Tabla 10 se muestra los análisis de correlación por invernadero. En resumen, los resultados obtenidos en los tres invernaderos muestran correlaciones débiles y, en su mayoría, no significativas. Las correlaciones más destacadas son para el nitrógeno en el invernadero MS3, donde se puede observar una correlación moderada, así como para el potasio en los invernaderos MS1 y MS2, aunque sin ser estadísticamente significativas. Por

otro lado, las variables como CE y pH mostraron correlaciones nulas o moderadas sin una tendencia clara, lo que indica que no hay una relación lineal fuerte entre las concentraciones de los nutrientes en el suelo y en la savia. En general, esto sugiere que la variabilidad en los niveles de nutrientes en la savia no depende de manera consistente de los niveles en el suelo.

Tabla 11. Valores de media de materia orgánica (MO), densidad aparente (DA), pH, conductividad eléctrica (CE).

Invernadero	MO	DA	pH	CE
	Media (%)	Media (g/cm ³)	Media	Media (mS/cm)
MS1	6,65	0,885	6,61	0,50
MS2	7,64	1,208	6,81	0,62
MS3	8,77	1,328	6,87	0,63

Fuente: Brito & Cabrera (2025).

La Tabla 11 muestra un resumen promedio de los valores de materia orgánica (MO), densidad aparente (DA), pH y conductividad eléctrica (CE) del suelo, estos agrupados por cada invernadero de estudio (MS1, MS2, MS3). Al analizar la materia orgánica del suelo, se observó que el valor más alto se encuentra en MS3, con (8,77%), seguido de MS2 con (7,64%) y MS1 con (6,65%), sugiriendo que tal incremento puede deberse principalmente a un mayor aporte de residuos orgánicos o una menor tasa de descomposición.

Por otra parte, en cuanto a la densidad aparente, el MS1 muestra la menor densidad (0,885 g/cm³), lo que puede indicar una mejor aireación del suelo, por lo tanto, un suelo más suelto. En contraste, MS3 presentó el valor de mayor densidad (1,328 g/cm³), lo cual sugiere que este último pueda tener una limitada infiltración del agua y desarrollo radicular.

En relación con el pH del suelo, los valores medios registrados en los tres invernaderos estuvieron por encima del rango óptimo para el cultivo de tomate (5,9 a 6,5). MS1 presentó el valor más cercano al ideal (6,61), mientras que MS2 (6,81) y MS3 (6,87) mostraron valores más alcalinos, lo cual podría influir negativamente en la disponibilidad de ciertos nutrientes.

Por otro lado, la conductividad eléctrica (CE) se mantuvo en niveles bajos en todos los invernaderos, con valores entre 0,50 mS/cm en MS1 y 0,63 mS/cm en MS3, indicando una baja acumulación de sales en el suelo. Este aspecto es favorable, ya que ayuda a evitar

problemas de salinidad que podrían limitar el desarrollo radicular y la absorción de nutrientes por parte del cultivo.

Para realizar la estimación de la textura del suelo se lo hizo en campo mediante el método sensorial, empleando muestras húmedas y siguiendo los criterios del Cuadro 25 (ver Anexo G), adaptado de Schlichting, Blume y Stahr (1995) según aparece en la FAO (2009) que se basa en las propiedades físicas perceptibles al tacto. En los tres invernaderos (MS1, MS2 y MS3), las muestras presentaron una alta cohesividad, fuerte adherencia a los dedos, gran plasticidad, facilidad para el moldeado y una superficie brillante al ser comprimidas entre los dedos. Estas características son típicas de suelos con predominancia de arcilla, por lo que se clasificaron como suelos de textura arcillosa.

6. Discusión

El análisis de la savia de pecíolo en plantas de *Solanum lycopersicum* L. reveló que las concentraciones promedio de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) presentaron variaciones importantes en relación con los rangos óptimos establecidos para este cultivo.

En el caso del nitrógeno, el valor medio observado fue de 580,1 ppm, ubicándose dentro del rango óptimo sugerido por Hochmuth (1994), quien presenta un resumen de los rangos de suficiencia de nitrato-N y potasio (K) en la savia del pecíolo, obtenidos a partir de 10 años de investigación con once hortalizas, entre ellos el tomate riñón. Menciona que el rango promedio de plantas que contienen frutos de aproximadamente 5 cm de diámetro es de 400–600 ppm, lo que indica un adecuado suministro de este nutriente en nuestro caso. Este resultado concuerda con los hallazgos de Hochmuth et al. (1991) quienes reportaron que las concentraciones de nitrato-N en la savia del pecíolo a inicios de temporada suelen superar los 1000 mg/L, pero reconocen que estas cifras tienden a disminuir con el avance del ciclo fenológico. Esto sugiere que la etapa de muestreo en esta investigación podría corresponder a una fase posterior al inicio de floración, cuando naturalmente disminuye la concentración de nitrato en la savia.

Respecto al potasio, se registró un valor medio de 5916,66 ppm, que sobrepasa de manera considerable el rango óptimo de referencia que va desde los 3000 a 3500 ppm (Hochmuth, 1994). Comparando con los datos del mismo estudio, las concentraciones de K adecuadas en la savia del pecíolo variaron entre 4000–5000 mg/L al inicio del ciclo y disminuían hacia la cosecha (2000–3000 mg/L). El valor elevado registrado en nuestro estudio podría atribuirse a un exceso de fertilización potásica. En contraste, al analizar el manejo agronómico de los tres invernaderos, se observa que la fertilización incluye la aplicación de muriato de potasio

(fuente directa de K) y fertilizantes compuestos como el 18-18-18 y el abono azul, todos ellos con un contenido relevante de potasio. Estos resultados coinciden con lo señalado por Esteves (2021) quien indica que una fertilización excesiva con K puede provocar acumulaciones en savia e incluso interferencias con otros nutrientes. Cheng et al. (2022) corroboraron que el uso irrazonable de K no solo puede causar desequilibrios nutricionales y afectar la eficiencia en la absorción de otros nutrientes, sino que también conduce al endurecimiento del suelo y a la alteración de la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Por otra parte, la concentración media de fósforo en la savia del pecíolo fue de 162,83 ppm. Si bien no existen rangos de suficiencia establecidos específicamente para fósforo en savia de tomate, este valor fue comparado con el promedio de 176 ppm reportado por Segura (1995), citado por Llanderal (2014), en un estudio sobre cultivos hortícolas intensivos en invernadero del sureste de España. La ligera diferencia podría indicar una posible deficiencia leve de fósforo, lo que podría explicarse por la interacción del tipo de sustrato con la disponibilidad del nutriente, tal como lo menciona Esteves (2021). El autor indica que la fijación del fósforo en ciertos suelos puede reducir su movilidad y, por tanto, su absorción, se reflejaría en menores concentraciones en la savia. Además, es importante considerar que diversos factores climáticos y fisiológicos pueden influir significativamente en la concentración de P en savia. Estudios realizados por Llanderal et al. (2020), han demostrado que variables como la evapotranspiración, el déficit de presión de vapor y el índice de área foliar pueden afectar los niveles de P en la savia.

En cuanto a los resultados obtenidos por invernadero se evidenció una clara variación en la concentración de nutrientes entre los distintos estados fenológicos representados por los invernaderos MS1 (cosecha), MS2 (fructificación) y MS3 (crecimiento vegetativo). Estos resultados se refuerzan con la información mostrada en la Figura 6, donde se evidencia que tanto el nitrógeno como el fósforo presentan sus mayores concentraciones en la savia durante la etapa de crecimiento vegetativo, disminuyen en fructificación, y son notablemente menores en cosecha. Este comportamiento guarda coherencia con lo señalado por Morard y Kerhoas (1982), citado por Llanderal (2014), quienes destacan que las concentraciones de nutrientes en savia varían según las etapas fenológicas del cultivo, reflejando cambios en las demandas metabólicas. Asimismo, el pH mostró una tendencia decreciente a lo largo del ciclo: desde un valor alto en crecimiento (7,1), bajando en fructificación (6,8) hasta alcanzar su punto más bajo en cosecha (5,4). Este descenso del pH podría estar asociado a una mayor actividad metabólica y absorción de nutrientes durante el desarrollo inicial del cultivo, como lo sugieren Llanderal et al. (2020), quienes destacan el papel del balance hídrico y la actividad fisiológica en la dinámica de nutrientes en savia.

El análisis mostró que en el invernadero MS1 que se encontraba en fase de cosecha los niveles de nitrógeno fueron de 153.60 ppm, valor considerablemente inferior al rango óptimo sugerido por Hochmuth (1994) que es de 200–400 ppm, lo que indica una clara deficiencia. Esta deficiencia puede atribuirse a una reducción natural en la disponibilidad del nutriente en el suelo o al agotamiento progresivo sin reposición, coincidiendo con lo planteado por Locascio et al. (1997), quien sostiene que los niveles de nitrato en los tejidos disminuyen hacia las etapas finales del cultivo si no se realiza una adecuada reposición.

Por otro lado, el invernadero MS2 en fases de fructificación los niveles de nitrógeno fueron de 784.96 ppm. lo que excede el rango óptimo de 400–600 ppm (Hochmuth, 1994), indicando un exceso o potencial acumulación de nitrógeno. Este comportamiento coincide con lo descrito por Leyva et al. (2005), quienes observaron que durante las etapas intermedias del cultivo es común encontrar concentraciones elevadas de nitrato en pecíolos, especialmente cuando existe una aplicación constante del nutriente. No obstante, estos valores pueden mantenerse altos incluso en etapas más avanzadas si el manejo agronómico no está ajustado a las necesidades reales del cultivo. En el invernadero MS3 (crecimiento), los niveles de nitrógeno fueron de 801.89 ppm, por debajo del rango óptimo de 1000–1200 ppm (Hochmuth, 1994). Esta deficiencia podría estar relacionada con la lixiviación del nutriente, donde el agua de riego lo arrastra hacia capas más profundas del suelo, reduciendo su disponibilidad para las plantas. Además, una aplicación insuficiente de nitrógeno en etapas previas del cultivo podría haber contribuido a este déficit, limitando el crecimiento y desarrollo del tomate (Leghari, 2016).

En cuanto a los niveles de potasio en el invernadero MS1, correspondiente a la etapa de cosecha, el nivel de potasio obtenido fue de 3925 ppm, ubicado por encima del rango óptimo de 2000-2500 ppm. En general, tener un valor elevado de potasio puede indicar que el cultivo está recibiendo más de lo que necesita del nutriente, lo que podría causar problemas en cuanto al estado nutricional de la planta. Además, Jaramillo et al., (2007) menciona que los excesos de potasio pueden interferir con la absorción de otros nutrientes esenciales como el calcio y el magnesio, lo que afecta negativamente en la fisiología de la planta y la calidad del fruto. En un estudio de Woldemariam et al. (2018) se destaca que cuando los niveles de potasio son mayores a las concentraciones óptimas, se reduce la eficiencia de absorción de nutrientes, por lo tanto, se puede ver comprometido el rendimiento y la calidad del tomate.

En la etapa de fructificación, correspondiente al invernadero MS2, se observó una concentración de potasio de 7450 ppm, lo que representa un exceso respecto al rango óptimo (3000-3500 ppm). Investigaciones han demostrado que concentraciones excesivas de

potasio pueden inhibir la absorción de calcio y magnesio debido a interacciones competitivas en los sitios de absorción de las raíces, lo que puede provocar desequilibrios nutricionales afectando negativamente la calidad del fruto (Qu et al., 2023). Además, un estudio de Hartz et al. (2001) menciona que la fertilización de K no siempre mejora la calidad del fruto, sino que, en algunos casos, puede no tener efecto significativo o incluso ser perjudicial si no se regula a las necesidades de cada cultivo.

Finalmente, en el invernadero MS3, durante la etapa de crecimiento vegetativo, se registraron niveles de potasio en savia de 6375 ppm, superando también el rango óptimo. A diferencia de la etapa de fructificación y cosecha, en esta fase vegetativa el exceso de potasio puede afectar negativamente el crecimiento del follaje, ya que interfiere en la absorción de nitrógeno, un elemento indispensable para la formación de tejidos nuevos (Xu et al., 2020). Estudios como los de Coskun et al. (2017) recalcan que altas concentraciones de este nutriente pueden inducir una deficiencia de nitrógeno, ya que este proceso puede inhibir la absorción adecuada de nitrógeno, un nutriente esencial para la formación de clorofila, proteínas y enzimas. Como resultado, se limita la eficiencia fotosintética, lo que afecta directamente el crecimiento del follaje y el desarrollo general del cultivo. Asimismo, describe un claro antagonismo entre el potasio y el nitrógeno, en el que un exceso de potasio puede restringir la absorción de nitrógeno, comprometiendo el equilibrio nutricional necesario para un correcto crecimiento vegetativo (Jaramillo et al., 2007).

En cuanto al fósforo se pudo notar variaciones en los tres invernaderos, en el MS1 se registró valores por debajo del rango óptimo mostrando una deficiencia, En MS2 los valores se encontraron ligeramente por debajo del umbral óptimo, mientras que el MS3 presentó un valor elevado lo que indica un posible exceso, Estas diferencias no parecen explicarse únicamente por las dosis de fertilizantes aplicadas, ya que todos los invernaderos utilizaron fuentes solubles de fósforo. Según Fernández (2007) la disponibilidad de fósforo está influenciada por su baja concentración en la solución del suelo (0.05 ppm), lo que hace que la difusión y el flujo de masas sean esenciales para su absorción. Además, los exudados radiculares y la actividad microbiana pueden modificar el entorno cercano a las raíces, facilitando el intercambio de fósforo y su absorción por las plantas. Por lo tanto, factores fisiológicos y edáficos también juegan un papel importante en las variaciones observadas en los niveles de fósforo entre los invernaderos. En este sentido, las características del suelo de los invernaderos también juegan un papel clave. El suelo arcilloso de los invernaderos tiene una alta capacidad de retención de nutrientes, lo que puede afectar la disponibilidad de fósforo. El pH en el rango de 6.3 a 6.98 en los tres invernaderos sugiere que el fósforo podría estar parcialmente fijado, afectando su disponibilidad para las plantas. Esto es consistente con lo

que afirman Sanzano (2013), citado por Echeverri (2019) y Múnera (2014), quienes destacan que un pH ligeramente ácido, como el registrado en los suelos de los invernaderos, puede limitar la disponibilidad de fósforo. Además, la alta retención de agua en suelos arcillosos puede disminuir la difusión de fósforo hacia las raíces, lo que podría explicar la deficiencia observada en MS1 y MS2. Por otro lado, el exceso registrado en el invernadero MS3 podría deberse a un manejo intensivo de fertilizantes fosfatados, lo que genera acumulación de fósforo en el suelo. Esto es consistente con lo planteado por Chen et al. (2022) quienes indican que una fertilización excesiva puede saturar la capacidad de adsorción del suelo, reduciendo la eficiencia del fósforo aplicado y aumentando el riesgo de pérdidas por lixiviación. Además, el menor uso del fósforo por parte del cultivo o las condiciones particulares del suelo en MS3 podrían haber favorecido esta acumulación.

Los resultados de la Figura 12 muestran que el pH del suelo y de la savia disminuyó progresivamente a lo largo del ciclo fenológico del cultivo, lo que influye directamente en la forma de nitrógeno absorbida por la planta. En etapas iniciales, con pH más alto y menor actividad fotosintética, se favorece la absorción de NH_4^+ , ya que su asimilación requiere menos energía en comparación con NO_3^- , que debe ser reducido dentro de la planta. En cambio, en fases más avanzadas como la fructificación y cosecha, el descenso del pH y el mayor desarrollo fisiológico favorecen la absorción de NO_3^- . Este comportamiento coincide con Coraspe et al., (2009) que destacan la influencia del pH y del estado metabólico de la planta en la preferencia por una u otra forma de nitrógeno.

La correlación general entre el contenido de nitrógeno en el suelo y en la savia, mostraron una correlación positiva moderada lo cual indica que a medida que existe un aumento en la concentración de nitrógeno en el suelo, también se observa un incremento en los niveles de nitrógeno en la savia. Sin embargo, la dispersión de los puntos sugiere que la relación no es completamente consistente ni fuerte, ya que las muestras no siguen un patrón claramente definido. Esta variabilidad puede estar vinculada a varios factores, incluidos los fenológicos, fisiológicos y ambientales que afectan la absorción de nitrógeno (Pino et al., 2012; Haifa, 2009 citado por Palacio et al., 2022).

En el invernadero MS1 en etapa de cosecha, las correlaciones fueron negativas y débiles, indicando que no existe una asociación clara entre los niveles de nutrientes del suelo y la concentración en la savia. Este comportamiento podría estar relacionado con la fase fenológica de la planta, ya que, como se ha reportado en otros estudios, durante la etapa de llenado del fruto, el nitrógeno acumulado en las hojas maduras es transportado hacia las más jóvenes, lo que podría interferir en la relación directa entre los nutrientes del suelo y los

concentrados en la savia (Marín et al., 1999). De manera complementaria, Berrueta y Grasso (2023) señalan que el consumo de nitrógeno en tomate presenta picos en fases específicas, particularmente entre los días 30 a 90 en otoño y entre los días 90 a 120 en primavera, coincidiendo con el crecimiento vegetativo. Esto sugiere que la absorción de nitrógeno por la planta está más determinada por su demanda fisiológica que por su disponibilidad en el suelo, lo que puede explicar la débil correlación observada.

Por otro lado, la correlación débil entre el nitrógeno en suelo y savia en el invernadero MS2 sugiere que a pesar que existe cierta tendencia, no siempre un mayor contenido de N en el suelo se traduce directamente en mayor absorción por la planta. Esto concuerda con lo señalado por Haifa (2009) citado por Palacio et al., (2022), quien advierte que el análisis de suelo no refleja con precisión la disponibilidad de N para el cultivo. Por tanto, para una fertilización más eficiente, es clave complementar el análisis del suelo con el monitoreo de la savia, considerando que la absorción y redistribución de nutrientes en la planta están influenciadas por factores fisiológicos, fenológicos y ambientales (Pino et al., 2012).

La correlación moderadamente positiva obtenida entre el nitrógeno (N) en la savia y en el suelo en el invernadero MS3 en etapa de crecimiento vegetativo sugiere una relación entre la disponibilidad del nutriente en el suelo y su absorción por la planta. Los estudios realizados por Locascio et al. (1997) y Taiz et al. (2015), indican que, durante el crecimiento vegetativo, el N es absorbido eficientemente por las plantas para el desarrollo de tejido nuevo, esto puede explicar la fuerte relación entre el N en savia y en suelo, dicha relación es común en etapas donde la planta utiliza el N para el crecimiento vegetativo.

Continuando con la correlación entre fósforo en el suelo y la savia, los resultados obtenidos muestran que la relación entre el contenido de fósforo (P) en el suelo y en la savia de las plantas varía significativamente entre los tres invernaderos evaluados (MS1, MS2 y MS3). Esta variabilidad coincide con lo observado en otro estudio, donde se ha demostrado que la concentración de nutrientes en la savia del pecíolo está fuertemente influenciada por factores agronómicos y climáticos, así como por el momento del muestreo durante el ciclo del cultivo (Llanderal et al., 2020). Esto impide establecer una correlación general, lo que sugiere que dicha relación depende de la fase fenológica del cultivo y de factores edáficos como el pH, la materia orgánica (MO) y la densidad aparente (DA) (Sun et al., 2023; Hojhabrian, 2014).

En el invernadero MS1, correspondiente a la etapa de cosecha, se observó una pendiente positiva entre el P del suelo y el de la savia, lo que indica que, incluso en fases tardías, la planta mantiene una cierta absorción del nutriente. Este comportamiento puede estar favorecido debido a la densidad aparente baja (0.885 g/cm^3), esta relaciona la aireación del

suelo y el desarrollo radicular, facilitando la absorción de nutrientes (Hamza & Anderson, 2005). Además, el fósforo continúa siendo importante en la maduración del fruto, por su papel en la transferencia energética (ATP) y el metabolismo de azúcares, es decir, en procesos de maduración de frutos (Vance et al., 2003).

En el invernadero MS2, en fase de fructificación, se observa una pendiente ligeramente negativa, lo que podría deberse a una menor eficiencia de absorción o a una inmovilización del fósforo bajo un pH más alto, donde tiende a unirse con calcio (Ca^{2+}) y formar compuestos no disponibles para la planta (Sun et al., 2023). Además, en esta etapa fenológica la planta tiende a priorizar la absorción de nutrientes necesarios para el desarrollo del fruto, lo cual podría desplazar temporalmente la demanda de fósforo (Shen et al., 2011).

En MS3, correspondiente a la fase de crecimiento vegetativo, la relación fue nula o negativa, lo cual puede reflejar una limitada absorción del fósforo a pesar de su disponibilidad en el suelo. Esto podría estar asociado a la alta densidad aparente (1.328 g/cm^3), que reduce la movilidad del fósforo y restringe el crecimiento radicular (Hamza & Anderson, 2005). Aunque este invernadero presentó el mayor contenido de materia orgánica (8.77 %), su efecto beneficioso puede verse limitado si el pH no se encuentra en el rango óptimo de disponibilidad de fósforo (Sun et al., 2023). Además, en las etapas tempranas del cultivo, la absorción de fósforo depende en gran medida de mecanismos biológicos como la exudación de ácidos orgánicos por las raíces y la actividad microbiana en la rizosfera (Richardson et al., 2009).

En cuanto a la correlación entre potasio en el suelo y savia, presenta una tendencia ligeramente positiva, aunque con una dispersión notable de los datos. Esta baja correlación podría explicarse por la dinámica de absorción y redistribución interna del potasio en la planta. Tamayo et al. (2022) han reportado que el K^+ tiende a acumularse en mayor proporción en el vástago que en la raíz, y que estas diferencias pueden estar influenciadas por la fuente y concentración del nutriente suministrado. Esto indica que, aunque el potasio está presente en el suelo, no necesariamente se refleja de forma proporcional en la savia, ya que la planta regula su transporte y acumulación en función de sus necesidades fisiológicas y de sus estructuras vegetales. De igual forma Aguado et al. (2002) indica que, aunque el contenido total de K en el suelo pueda ser alto, no necesariamente está relacionado con la forma disponible para las plantas pues las fracciones de K solubles e intercambiables son las que determinan su disponibilidad real para las plantas, lo que podría explicar la baja correlación observada entre el potasio en el suelo y en la savia.

La correlación observada en MS1 entre el contenido de potasio en suelo y savia puede deberse a que, incluso en la etapa de cosecha, el tomate continúa absorbiendo activamente

potasio, como se ha reportado en estudios previos donde hasta el 70% del potasio total se acumula durante la fructificación, y solo un pequeño porcentaje proviene de redistribución interna (Widders & Lorenz, 1982). Este comportamiento subraya la importancia del potasio en las etapas finales del desarrollo del cultivo, especialmente para el llenado del fruto.

En el invernadero MS2, correspondiente a la etapa de fructificación, se observó una relación moderada entre la concentración de potasio en el suelo y en la savia. Estos resultados coinciden con lo reportado por Liu & Puyu (2021), quienes señalaron que el aumento de potasio en el suelo incrementa significativamente la concentración de K en las hojas y su acumulación total en la planta. Este efecto es clave, ya que un mayor contenido foliar de K puede mejorar directamente el rendimiento y la calidad del fruto. De forma complementaria, Fernandes et al. (2020) encontraron una correlación moderada ($r \approx 0.45$) entre el potasio intercambiable en el suelo y el K foliar durante la formación del fruto en banano, lo que refuerza la importancia de la disponibilidad de este nutriente en etapas reproductivas para su correcta absorción y movilización.

En el invernadero MS3, correspondiente a la etapa de crecimiento vegetativo, se observó una relación positiva entre K en suelo y savia, aunque con una pendiente menor, lo que sugiere una respuesta más limitada del cultivo al potasio disponible. Petrovic et al. (2005), señalaron en su estudio que la aplicación de K por sí solo no incrementó el contenido de K en tejidos, y que los niveles de K considerados adecuados en análisis de suelo podrían sobreestimar la verdadera disponibilidad para la planta. Además, este resultado coincide con lo reportado por Widders y Lorenz (1998) quienes en su estudio señalan que, durante la etapa vegetativa, las hojas jóvenes acumulan K, pero como la planta aún no ha distribuido significativamente el K hacia los frutos, pequeñas variaciones en la concentración de K en el suelo no provocan cambios grandes en la concentración de savia. La baja correlación observada en esta etapa sugiere que la planta ya disponía de K suficiente desde el suelo, y, por lo tanto, la savia no reflejó de manera destacada los niveles del suelo.

En los resultados obtenidos de la correlación entre pH en el suelo y la savia, se puede observar que existe una relación entre el pH del suelo y el de la savia, presentando una tendencia ascendente, aunque no sea considerada una relación lineal ni fuerte. Esto coincide con lo observado por Guo et al. (2021), quienes reportan que la aplicación de biocarbón en tomate puede incrementar el pH tanto del suelo como de la savia (xilema), evidenciando de esta manera una correlación positiva, aunque moderada, entre ambos parámetros. Por tal motivo, si bien el pH del suelo puede influir en el pH de la savia, puede estar influenciada por

diversos factores fisiológicos y nutricionales que modulan la absorción iónica y el equilibrio interno de la planta.

En el caso de MS1, que se encontraba en cosecha, se observó una tendencia negativa entre el pH del suelo y el pH de la savia, indicando que a medida que el suelo se vuelve más alcalino, el pH de la savia disminuye. Esto se le puede atribuir a una menor demanda transpiracional y la redistribución de solutos al final del ciclo del cultivo, lo cual altera el equilibrio iónico interno de la planta. Jia & Davies (2007) mencionan que, en situaciones de menor transpiración o estrés hídrico, el pH de la savia tiende a aumentar como respuesta fisiológica. No obstante, en este caso, la disminución del pH de la savia frente a un suelo más alcalino podría deberse a una deficiencia nutricional en las últimas etapas del cultivo, posiblemente por la incorrecta absorción de micronutrientes como Fe y Mn en suelos más básicos, como sugieren Blevins et al. (1974).

En MS2 (fase de fructificación), se observa una correlación positiva fuerte entre el pH del suelo y el pH de la savia. En esta etapa se da una demanda de nutrientes, por lo general, de nitrato, potasio y calcio, los cuales son más disponibles en suelos con pH neutro o ligeramente alcalino (Greenwood, Stone, & Wood, 1991). La absorción de NO_3^- , se considera muy favorecida en estos suelos, alcaliniza la savia gracias a la carga aniónica transportada con el ion y al aumento de compuestos como el malato. De esta manera, los resultados observados en el invernadero con fase de fructificación coinciden con lo reportado en estudios fisiológicos donde si se tiene una nutrición adecuada, especialmente con nitrato, va a inducir a que exista un aumento del pH en la savia de plantas de tomate (Jia & Davies, 2007; Blevins et al. 1974).

Asimismo, el MS3, que se encontraba en fase vegetativa, también presentó valores altos de pH en suelo y savia, pero con una tendencia negativa, lo cual puede resultar inusual. Durante esta etapa, la planta destina más tiempo al crecimiento foliar, mientras que la absorción de nitrógeno es moderada. Como indican estudios sobre dinámica nutricional en tomate, la mayor absorción de nitrato se da en floración y post-cuajado (Haifa Group, 2014), por lo que es posible que en esta etapa la planta aún esté regulando su equilibrio iónico interno de forma distinta. Este menor ingreso de aniones (NO_3^-) puede favorecer una mejor absorción relativa de cationes (K^+ y Ca^{2+}), lo que podría provocar una acidificación del pH de la savia, y puede incrementar si se tiene una alta transpiración, concluyendo que, cuando existe una intensa transpiración esto va a contribuir a que existan cambios en el pH interno (Jia & Davies, 2007).

La conductividad eléctrica (CE) en la savia del pecíolo representa una medida indirecta de la concentración total de solutos iónicos disueltos en el fluido vegetal. A pesar de su utilidad práctica para monitorear el estado nutricional de la planta, especialmente en condiciones de

cultivo intensivo como los invernaderos, no se dispone actualmente de valores de referencia ampliamente establecidos para la CE de savia en cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Esta limitación ha sido reconocida en varios estudios recientes, los cuales priorizan la medición específica de iones como NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} o Na^+ mediante sensores portátiles, sin abordar directamente la CE como parámetro global.

En este contexto, los resultados mostraron correlaciones débiles o no significativas entre la CE del suelo y la CE de la savia en tomate, lo cual es comprensible dado que no existen valores estandarizados de CE en savia y su variación depende de múltiples factores fisiológicos, como la absorción y transporte de nutrientes. A diferencia del suelo, donde la CE es un indicador más directo de salinidad, en la savia refleja procesos internos más complejos, y por eso no siempre guarda una relación lineal con el suelo (Jia & Davies, 2007). Además, la mayoría de estudios se enfocan en nutrientes específicos de la savia (como NO_3^- y K^+), no en su CE total, lo que limita las comparaciones directas y puede explicar la falta de significancia estadística observada.

7. Conclusiones

El análisis de savia de pecíolo evidenció variaciones significativas en las concentraciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) según el invernadero y la etapa fenológica del tomate. El N estuvo dentro del rango óptimo, salvo deficiencias en MS1 (cosecha) y MS3 (vegetativo), asociadas a factores como lixiviación o mal manejo agronómico; en MS2 (fructificación) hubo exceso, indicando sobre-fertilización. El K se encontró en exceso en todos los invernaderos, sobre todo en MS2 y MS3, lo que podría interferir en la absorción de otros nutrientes. El P fue bajo en MS1 y MS2, y elevado en MS3, lo que sugiere influencia de factores edáficos y fisiológicos más allá de la fertilización. En conjunto, los resultados destacan la necesidad de ajustar el manejo nutricional según la etapa fenológica y con base en el monitoreo de savia, para evitar desequilibrios y mejorar la producción y calidad del cultivo bajo invernadero.

El estudio evidenció la relación entre los niveles de N, P y K en el suelo y en la savia del pecíolo de *Solanum lycopersicum* L. varió según el invernadero y la etapa fenológica. En general, el nitrógeno mostró una correlación moderadamente positiva, indicando que su presencia en el suelo influye en su absorción. La correlación débil o negativa en MS1 y MS2 sugiere que factores como la redistribución interna del nutriente, la lixiviación y las demandas fisiológicas de la planta pueden tener un mayor impacto en su disponibilidad en savia que su concentración en el suelo. Para el fósforo, no se identificó una correlación clara entre el suelo y la savia, lo que sugiere que su absorción no depende únicamente de su disponibilidad

edáfica. En MS1, se observó una tendencia positiva, mientras que en MS2 y MS3 la relación fue débil o negativa indicando que la dinámica de este nutriente está fuertemente condicionada por las condiciones agronómicas y fenológicas del cultivo. El potasio tuvo correlación moderada en MS1 y MS2, pero más baja en MS3, reflejando la influencia de la demanda fisiológica. El pH mostró relación parcial entre suelo y savia, sugiriendo que los cambios en el medio edáfico pueden influir en el equilibrio iónico interno de la planta. Finalmente, la CE no evidenció correlación. lo que sugiere que la cantidad total de sales disponibles en el suelo no siempre se refleja directamente en la composición iónica del fluido vegetal.

En conclusión, esta investigación ha permitido profundizar en la dinámica de los nutrientes en suelos y plantas, destacando la complejidad de la interacción entre ambos factores y su influencia en el crecimiento y salud del tomate riñón. Los hallazgos subrayan la importancia de considerar diversos factores ambientales y fisiológicos al optimizar el manejo nutricional en sistemas agrícolas controlados. A medida que la agricultura enfrenta retos crecientes relacionados con la sostenibilidad y la eficiencia de los recursos, la integración de análisis tanto de suelo como de savia ofrece una herramienta valiosa para promover prácticas más eficientes, reducir impactos negativos y garantizar la calidad de los cultivos.

8. Recomendaciones

Se recomienda profundizar la investigación sobre deficiencias nutricionales del tomate bajo condiciones de invernadero, incluyendo no solo los nutrientes principales (N, P, K), sino también otros elementos como calcio, magnesio y azufre, que podrían influir en la salud y productividad del cultivo. Además, futuras investigaciones deben adaptarse a las condiciones edafoclimáticas locales para generar información más precisa y aplicable.

Es necesario establecer umbrales diagnósticos específicos para los niveles de nutrientes en savia y suelo, adaptados a los distintos sistemas productivos. Estos rangos permitirán detectar de manera más precisa desequilibrios nutricionales y mejorar el manejo de fertilización. Para ello, se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo que permita ajustar los programas de fertilización de forma oportuna y eficiente.

La capacitación de los agricultores es clave para lograr un manejo nutricional adecuado. Es fundamental fortalecer procesos de formación sobre interpretación de análisis de suelo y savia, así como el uso práctico de esta información en el manejo de los cultivos. Además, se debe promover el uso de fertilización integrada, combinando insumos químicos, biofertilizantes y enmiendas orgánicas, para reducir costos y mejorar la sostenibilidad.

9. Referencias

- Aguado, G., Etchevers, J., Hidalgo, C., & Galvis, A. (2002). Dinámica del potasio en suelos agrícolas. *Agrociencia*, 36(1), 11-21.
- Ahmad Munir: Alam, S., Ahmad, W., Jan, I., & Zia, A. (2018). Application of the 4R nutrient stewardship concept for growing off-season tomatoes in high tunnels. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(4), 998-1001. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005002803>
- Allende, M., Salinas, L., & Torres, A. (2017). *Manual de cultivo del tomate bajo invernadero*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/29478>
- Asociación de Agrónomos indígenas de Cañar. (2003). *El cultivo de tomate riñón en invernadero (lycopersicum esculatum)*. Abya-Yala. https://digitalrepository.unm.edu/abya_yala/367
- Ávila, L., & Rodríguez, M. (2020). Diagnóstico rápido de NPK en tomate mediante análisis de savia del pecíolo con el método DRIS. *Horticultura Brasileira*, 38(3), 306-311. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620200311>
- Banco Central del Ecuador. (2020). *Reporte de coyuntura sector agropecuario*. <https://www.bce.fin.ec>
- Bar-Yosef, B. (1999). Advances in fertigation. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 65, pp. 1–77). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)60910-4](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60910-4)
- Berrueta, C., & Grasso, R. (2023). Absorción de nitrógeno por el cultivo de tomate en invernáculo. *Revista INIA(74)*, 33-36.
- Blevins, D. G., Hiatt, A. J., & Hageman, R. H. (1974). Function of nitrate and nitrite reductases in the assimilation of nitrogen by tomato plants. *Plant Physiology*, 54(3), 404–408.
- Chapagain, B. P., & Wiesman, Z. (2004). Effect of potassium magnesium chloride in the fertigation solution as partial source of potassium on growth, yield and quality of greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae*, 99(3–4), 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2003.08.015>
- Chemonics International Inc. (2008). *Manual de cultivo de tomate*. MCA.

- Chen, X., Yan, X., Wang, M., Cai, Y., Weng, X., Su, D., . . . Wu, L. (2022). Long-term excessive phosphorus fertilization alters soil phosphorus fractions in the acidic soil of pomelo orchards. *Soil and Tillage Research*, 215, 2-15.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105214>
- Cheng, B., Qingkai, S., Wei, J., & Ma, W. (2022). Effect of Different Long-Term Potassium Dosages on Crop Yield and Potassium Use Efficiency in the Maize–Wheat Rotation System. *Agronomy*, 12(10). doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy12102565>
- Comité Nacional de Límites Internos. (s.f.). *Información geoespacial de límites administrativos del Ecuador*. Recuperado el 25 de abril de 2025, de <https://www.conali.gob.ec/>
- Coraspe, H. M., Muraoka, T., Ide Franzini, V., Contreras Espinal, F. S., & Ocheuze Trivelin, P. C. (2009). Absorción de formas de nitrógeno amoniacal y nítrica por plantas de papa en la producción de tubérculo-semilla. *Agronomía Tropical*, 59(1), 45–58.
- Coskun, D., Britto, D. T., & Kronzucker, H. J. (2017). *The nitrogen–potassium intersection: membranes, metabolism, and mechanism*. *Plant, Cell & Environment*, 40(5), 1007–1021. <https://doi.org/10.1111/pce.12671>
- Díaz, L., Canto, M., Alegre, J., Camarena, F., & Alberto, J. (2017). Sostenibilidad social de los subsistemas productivos de tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav) en el cantón Guachapala provincia de Azuay-Ecuador. *Ecología Aplicada*, 2(16).
- Díaz, R., & Hunter, A. (2014). *Metodología de muestreo de suelos, Análisis químico de suelo y tejido vegetal y de investigaciones en invernadero*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Echeverri, J. (2019). *Dinámica del fósforo en suelo-planta en regiones tropicales*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia].
- Eguez, E., & Ramos, P. (2022). Diagnóstico experimental de deficiencia de macronutrientes en cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Centrosur Agraria*.
<https://centrosuragraria.com/index.php/revista/article/view/186>
- Escobar, H., & Lee, R. (Eds.). (2009). *Manual de producción de tomate bajo invernadero*. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

- Esri, Maxar, Earthstar Geographics, & GIS User Community. (s.f.). *World Imagery basemap*. Recuperado el 25 de abril de 2025, de <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9>
- Esteves, E., Locatelli, G., Bou, N. A., & Ferrarezi, R. S. (2021). Análisis de savia: Una herramienta eficaz para el monitoreo de la nutrición vegetal. *Horticulturae*, 7(11), 426. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7110426>
- Fanasca, S., Colla, G., Maiani, G., Venneria, E., Roupheal, Y., & Azzini, E. (2006). Changes in antioxidant content of tomato fruits in response to cultivar and nutrient solution composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(11), 4319–4325. <https://doi.org/10.1021/jf060049p>
- FAO. (2021). FAOSTAT: Base de datos estadísticos corporativos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Fernandes, G., Cantú, R., Scherer, R., Beltrame, A., & Mendes de Haro, M. (2020). Banana crop nutrition: insights into different nutrient sources and soil fertilizer application strategies. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. doi:<https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20190104>
- Fernández, M. T. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XLI(2), 51-57.
- Flores, E., Sandoval, M., Guzmán, M., Vásquez, M., & Sabino, J. (2021). Estado nutrimental en el extracto celular de pecíolo y hojas de genotipos de Jamaica. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* (Esp. II: e2928). <https://doi.org/10.19136/era.a8nII.2928>
- GAD Guachapala. (2014). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial-Cantón Guachapala*. Gobierno Autónomo Descentralizado de Guachapala.
- Greenwood, D. J., Stone, D. A., & Wood, M. (1991). Fertilizer use and productivity of food crops. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 333(1266), 381–392.
- Guo, L., Bornø, M. L., Niu, W., & Liu, F. (2021). Biochar amendment improves shoot biomass of tomato seedlings and sustains water relations and leaf gas exchange rates under

- different irrigation and nitrogen regimes. *Agricultural Water Management*, 245, 106580.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106580>
- Haifa Group. (2014). *Tomato crop guide: Fertilization recommendations for tomatoes*.
Recuperado de <https://www.haifa-group.com/es/gu%C3%ADa-de-cultivo-nutrici%C3%B3n-de-la-planta-de-tomate>
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Hartz, T. K., Miyao, E. M., Mullen, R. J., & Cahn, M. D. (2001). Potassium fertilization effects on processing tomato yield and fruit quality. *Acta Horticulturae*, 542, 127–134.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.542.15>
- Hochmuth, G. (1994). Efficiency Ranges for Nitrate-Nitrogen and Potassium for Vegetable Petiole Sap Quick Test. *HortTechnology*, 4(3), 218-222. doi:
<https://doi.org/10.21273/HORTTECH.4.3.218>
- Hochmuth, G., Hochmuth, B., Hanlon, E., & Donley, M. (1991). *Nitrogen requirements of mulched eggplant in northern Florida*. Florida Coop. Ext. Serv. Suwannee Valley Agr. Res. and Educ. Center Res. Rpt. 91-14.
- Hojhabrian, M. (2014). Effect of different soil pHs and potassium and phosphorous concentrations on quantitative and qualitative characteristics of Tomato fruit (*Lycopersicon esculentum* c.v Calji). *European Journal of Experimental Biology*, 4(3), 86–92.
- INTAGRI. (2020). Extracto Celular de Peciolo: Herramienta de Diagnóstico del Estado Nutricional del Cultivo. *Serie Nutrición Vegetal*(44).
- Jaramillo, J., Rodríguez, V. P., Guzmán, M., Zapata, M., & Rengifo, T. (2007). *Manual técnico: Buenas prácticas agrícolas en la producción de tomate bajo condiciones protegidas*.
FAO, Gobernación de Antioquia - MANA, CORPOICA, Centro de Investigación La Selva
- Jia, W., & Davies, W. J. (2007). Modification of leaf apoplastic pH in relation to stomatal sensitivity to root-sourced abscisic acid signals. *Plant Physiology*, 143(1), 68–77.
<https://doi.org/10.1104/pp.106.089110>

- Leghari, S., Wahocho, N., Laghari, G., HafeezLaghari, A., MustafaBhabhan, G., HussainTalpur, K., . . . Wahocho, S. (2016). Role of Nitrogen for Plant Growth and Development: A review. *Advances in Environmental Biology*, 10(9), 209-218. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/309704090>
- Leguizamón, A., Balbuena, A., Fleitas, L., Quintana, C., Sánchez, M., & Ruiz, E. (2024). Efecto de la fertilización potásica y arreglos espaciales en la producción de tomate (*lycopersicum esculentum mill*). *Alfa Revista de Investigaciones en Ciencias Agronómicas y veterinarias*, 8(22), 29-40. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i22.245>
- Leyva, G., Sánchez, P., Alcántar, G., Gavi, F., & Martínez, Á. (2005). Contenido de nitratos en extractos celulares de pecíolos y frutos de tomate. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(2), 145-150.
- Liu, J., & Puyu, F. (2021). Effect of potassium fertilization during fruit development on tomato quality, potassium uptake, water and potassium use efficiency under deficit irrigation regime. *Agricultural Water Management*, 250(7).
- Llanderal Quiroz, A. (2014). *Concentración de nutrientes en savia en cultivo de tomate bajo invernadero* [Tesis de maestría, Universidad de Almería]. Repositorio Institucional de la Universidad de Almería.
- Llanderal, A., García-Caparrós, P., Pérez-Alonso, J., Contreras, J. I., Segura, M. L., Reça, J., & Lao, M. T. (2020). Enfoque del método de diagnóstico nutricional de la savia del peciolo mediante un modelo empírico basado en parámetros climáticos y de crecimiento. *Agronomía*, 10(2), 188. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020188>
- Locascio, S., Hochmuth, G., Rhoads, F., Olson, S., Smajstrla, A., & Hanlon, E. (1997). Nitrogen and Potassium Application Scheduling Effects on Drip-irrigated Tomato Yield and Leaf Tissue Analysis. *HortScience*, 32(2), 230-235. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.32.2.230>
- Marín, M., Rendiles, E., Ekmeiro, L., González, J., Primera, J., & Casanova, A. (1999). Relación entre el contenido de nitrógeno foliar y la producción del guayabo (*Psidium guajava L.*). *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Zulia*, 16(1), 17-22. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/26300>

- Martí, R., Roselló, S., & Cebolla, J. (2016). El tomate como fuente de carotenoides y polifenoles para la prevención del cáncer. *Cancers*, 8(6), 58.
<https://doi.org/10.3390/cancers8060058>
- Martín, M., & Pérez, R. (1992). Importancia del análisis foliar en la evaluación de la fertilidad de suelos en Venezuela. Una revisión. *Revista de Agronomía*, 9(1), 1-15.
- Meza, J., Pantoja, A., Galan, P., Godoy, N., Gattini, J., Villasanti, C., & Díaz, J. (2013). *El cultivo de tomate con buenas prácticas agrícolas en la agricultura urbana y periurbana*. FAO.
- Múnera, G. (2014). *El fósforo elemento indispensable para la vida vegetal*. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://hdl.handle.net/11059/5248>
- OpenStreetMap contributors. (s.f.). *OpenStreetMap*. Recuperado el 25 de abril, de <https://www.openstreetmap.org/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2009). *Guía para la descripción de suelos* (R. Vargas Rojas, Trad. y adapt., 4.ª ed.). FAO.
- Palacio, M., Cayón, D., Mira, C., Magnitsky, & García, M. (2022). Diagnóstico nutricional de banano (*Musa AAA Simmonds* subgrupo Cavendish) con análisis de savia radicular. *Pesquisia Agropecuaria Tropical*, 52.
- Pavan, S., van Heusden, A. W., & Bai, Y. (2009). *Solanum lycopersicum* (Tomato). En *Encyclopedia of Life Sciences (ELS)*. John Wiley & Sons, Ltd.
<https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0003686>
- Pérez, H., Chávez, J., Carrillo, G., Rodríguez, M. d., & Ascencio, R. (2017). Fertilización foliar en el rendimiento y calidad de tomate en hidroponía bajo invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2), 333-343.
- Petrovic, A., Soldat, D., Gruttadaurio, J., & Barlow, J. (2005). TURFGRASS GROWTH AND QUALITY RELATED TO SOIL AND TISSUE NUTRIENT CONTENT. *International Turfgrass Society Research Journal*, 10, 989-997.
- Pino, P., Callejas, R., Razeto, B., & Gabino, R. (2012). Análisis químico del extracto peciolar para evaluar el estado nutricional en la vid. *Pesquisia Agropecuaria Brasileira*, 47(1), 111-117.<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000100015>

- Qu, S., Li, H., Zhang, T., Kou, G., Chen, P., & Yang, Y. (2023). Interactive effects of potassium and magnesium on nutrient uptake, accumulation and allocation of tomato. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 29(5), 935–948.
<https://doi.org/10.11674/zwyf.2022526>
- Richardson, A. E., Lynch, J. P., Ryan, P. R., Delhaize, E., Smith, F. A., Smith, S. E., ... & Simpson, R. J. (2009). Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant and Soil*, 321(1–2), 305–339.
<https://doi.org/10.1007/s11104-009-9894-9>
- Savvas, D., Ntatsi, G., & Passam, H. (2008). Plant nutrition and physiological disorders in greenhouse grown tomato, pepper and eggplant. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*, 2(1), 45–61.
- Segura, M. L. (1995). *Fertirrigación de cultivos hortícolas en condiciones salinas con sistema enarenado y sustratos alternativos*. Comarca Agrícola de Almería. Universidad Autónoma de Madrid.
- Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., Zhang, W., & Zhang, F. (2011). Phosphorus dynamics: From soil to plant. *Plant Physiology*, 156(3), 997–1005.
<https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>
- Sistema de Información Pública Agropecuaria [SIPA]. (2020). *Cifras agroproductivas*.
<http://sipa.agricultura.gob.ec/>
- Sun, Y., Duan, L., Zhong, H., Cai, H., Xu, J., & Li, Z. (2024). Effects of irrigation-fertilization-aeration coupling on yield and quality of greenhouse tomatoes. *Agricultural Water Management*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108893>
- Sun, D. L., Wang, Y., Zhou, J., Fu, R. T., Zhang, Y. L., Yu, N., & Zou, H. T. (2023). Effects of long-term application of organic fertilizer on soil available phosphorus content and leaching risk in greenhouse tomato cultivation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 31(11), 1792–1803.
- Tamayo, J., Carmona, L., & Urrea, A. (2022). Efecto de la concentración del potasio (K+) sobre el desarrollo morfológico y procesos fisiológicos de plántulas de cinco genotipos de *Theobroma cacao* L. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 121(2), 1-15.
<https://doi.org/10.24215/16699513e094>

- Terry, E., Ruiz, J., & Carrillo, Y. (2018). Efecto de diferentes manejos nutricionales sobre el rendimiento y calidad de frutos de tomate. *Agronomía Mesoamericana*, 29(2). <https://doi.org/10.15517/ma.v29i2.28889>
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157(3), 423–447. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>
- Widders, I., & Lorenz, O. (1982). Potassium Nutrition during Tomato Plant Development1. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 107(6), 960-964. DOI: 10.21273/JASHS.107.6.960
- Willumsen, J., Petersen, K. K., & Kaack, K. (1996). Yield and blossom-end rot of tomato as affected by salinity and cation activity ratios in the root zone. *Journal of Horticultural Science*, 71(1), 81–98. <https://doi.org/10.1080/14620316.1996.11515306>
- Woldemariam, S. H., Lal, S., Zelelew, D. Z., & Solomon, M. T. (2018). Effect of potassium levels on productivity and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Journal of Agricultural Studies*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.5296/jas.v6i1.12262>
- Xu, X., Du, X., Wang, F., Sha, J., Chen, Q., Tian, G., Zhu, Z., Ge, S., & Jiang, Y. (2020). Effects of potassium levels on plant growth, accumulation and distribution of carbon, and nitrate metabolism in apple dwarf rootstock seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 11, 904. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00904>Frontiers+6

Anexos

Anexo A. Invernaderos de Guachapala utilizados para la investigación.



Vista exterior y vista panorámica interior respectivamente del primer invernadero, en el cantón Guachapala.



Vista exterior y vista panorámica interior respectivamente del segundo invernadero, en el cantón Guachapala.



Anexo A.C. Vista exterior y vista panorámica interior respectivamente del tercer invernadero, en el cantón Guachapala.

Anexo B. Proceso de recolección de muestras vegetales



Anexo B.A. Selección y recolección de hojas de tomate.



. Almacenamiento de muestras en fundas de plástico dentro del cooler

Anexo C. Extracción de savia y análisis en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca



Separación de pecíolos para extracción de savia.



Prensa manual para obtención de la savia del peciolo.



Determinación de nitratos (N-NO_3^-), potasio (K), fósforo (P), conductividad eléctrica (CE) y pH en savia de peciolo.

Anexo D. Muestreo de suelo en campo



Anexo D.A. Extracción de muestras de suelo en campo.



Almacenamiento en fundas plásticas y cajas de madera para transporte.

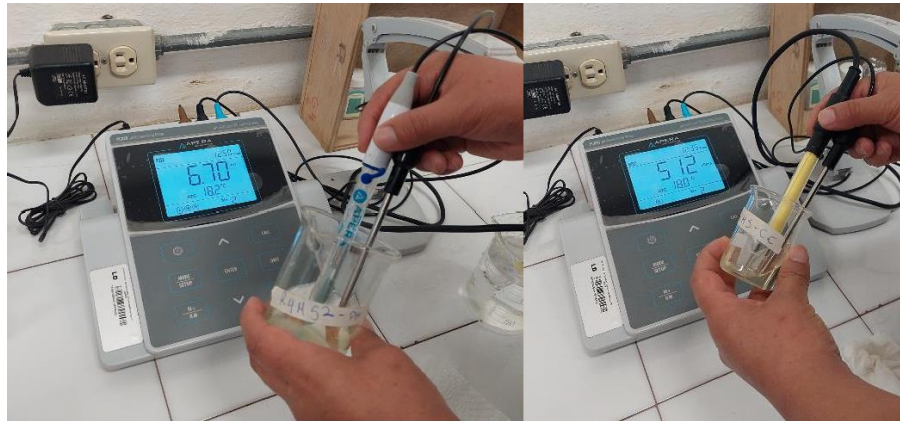


Extracción de muestras para densidad aparente del suelo con anillos.

Anexo E. Análisis de suelo en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca



Preparación de muestras de suelo.



Medición de pH y conductividad eléctrica (CE) del suelo.

AGROBIOLAB CIA. LTDA.			
Informe de Análisis			
Gonzalo Zafambulo Nelli 204 y Luis Cevallos Urb. Dammer 2 (El Inca) Tel: (593-2) 241-2383 / 241-7385 Quito - Ecuador			
Datos del Cliente		Referencia	Interpretación
Cliente: SUAREZ MORALES	No. Doc: 57774	Textura	pH
Propiedad: FAMILIA SUAREZ	Emisión: 17/04/2025	Argiloso	Acid. 4.5 - 5.5
Dirección: San Roque	Impreso: 17/04/2025	Fine - Franco	B = Bajo
Telefono: 0991338284	Código: Tercera mesa	Ar. - Arcilloso	M = Medio
Proyecto: 14942025	**Empleo: 14942025	Lo - Lodoso	PH = Proc. Neutral
No. Lab.: Ciudad: 16420	Fecha: 16/01	Arg. - Arenoso	S = Suficiente
		Arg. - Franca	A = Alto

Nombre: R1MS				
No. Lab:	Profundidad (cm):	N	P	K
16420	0-20	0.07	207.50 A	6.47 B
			1.02	0.04

Gráfico															
A															AL
G															LA1
M															PH
B															LA2
															Ac

- Muestras de suelo rotuladas y empacadas para su envío al laboratorio AGROBIOLAB, donde se analizaron los niveles de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K).



Análisis de densidad aparente del suelo en el laboratorio.



Determinación de materia orgánica del suelo en el laboratorio.



Determinación de textura en el laboratorio.

Anexo F. Registro de datos en campo y en laboratorio



Registro de datos en libreta de campo.



Anexo F.B. Registro de datos en laboratorio.

Anexo G. Claves para las clases texturales del suelo (Cuadro 25)

CUADRO 25

Clave para las clases texturales del suelo

			-% arcilla	
1	No es posible enrollar y formar un cordón cilindro o chorizo de un diámetro cercano a 7mm (como el diámetro de un lápiz)			
1.1	no ensucia, no es harinoso, no deja material fino en los dedos:	arena	A	< 5
	• Si el tamaño de granos es mixto:	arena no clasificada	AN	< 5
	• Si la mayoría de granos son muy gruesos (> 0,6 mm):	arena muy gruesa y gruesa	AG	< 5
	• Si la mayoría de granos son de tamaño medio (0,2-0,6 mm):	arena media	AM	< 5
	• Si la mayoría de granos son de tamaño fino (< 0,2 mm) pero aún granuloso:	arena fina	AFi	< 5
	• Si la mayoría de granos son de tamaño muy fino (< 0,12 mm), tendiendo a ser harinoso:	arena muy fina	AMF	< 5
1.2	no es harinoso, granuloso, material escasamente fino entre los dedos, débilmente moldeable, ligeramente adhesivo a los dedos:	arena francoso	AF	< 12
1.3	Similar a 1,2 pero moderadamente harinoso:	franco arenoso	FA (pobre en arcilla)	< 10
2	Es posible enrollar y formar un cordón cilindro o chorizo de un diámetro de 3-7 mm (cerca a la mitad del diámetro de un lápiz) pero se rompe cuando se trata de formar el cordón cilindro de 2-3 cm de diámetro, moderadamente cohesivo, se adhiere a los dedos			
2.1	Muy harinoso y no cohesivo			
	• Se sienten algunos granos:	franco limoso	FL (pobre en arcilla)	< 10
	• No se sienten granos:	limoso	L	< 12
2.2	Moderadamente cohesivo, se adhiere a los dedos, tiene una superficie áspera y desmenuzada luego de apretarla entre los dedos y			
	• Muy granuloso y no pegajoso:	franco arenoso	FA (rico en arcilla)	10-25
	• Granos moderadamente arenosos:	franco	F	8-27
	• No granuloso pero distintamente harinoso y algo pegajoso:	franco limoso	FL (rico en arcilla)	10-27
2.3	De superficie áspera y moderadamente brillante luego de apretarlo entre los dedos, es pegajoso y granuloso a muy granuloso:	franco arcillo arenoso	FYA	20-35
3	Es posible enrollar y formar un cordón chorizo de más o menos 3 mm de diámetro (menos de la mitad del diámetro de un lápiz) y formar un aro de 2-3 cm en diámetro, cohesivo, pegajoso, rechinamiento entre los dientes, tiene una superficie moderadamente brillante luego de apretarlo entre los dedos.			
3.1	muy granuloso:	arcillo arenoso	YA	35-55
3.2	Se ve y se sienten algunos granos, rechinamiento entre los dientes			
	• Moderadamente plástico, superficie moderadamente brillante:	franco arcilloso	FY	25-40
	• Alta plasticidad, superficie brillante:	arcilloso	Y	40-60
3.3	No hay granos visibles, ni se sienten, no hay rechinamiento entre los dientes			
	• Plasticidad baja:	franco arcillo limoso	FYL	25-40
	• Plasticidad alta, superficie moderadamente brillante:	arcillo limoso	YL	40-60
	• Plasticidad alta, superficie brillante:	arcilla pesada	YP	> 60

Nota: La determinación de la textura en campo puede depender de la composición mineralógica de las arcillas. La clave anterior funciona especialmente para suelos que tienen en su composición illita, clorita y/o vermiculita. Las arcillas esmecticas son más plásticas, y las arcillas caolinicas son más pegajosas. Así, el contenido de arcilla puede ser sobrestimado para la primera y subestimado para la segunda.

Fuente: Adaptado de Schlichting, Blume y Stahr (1995).

Anexo H. Base de datos utilizada en el procesamiento de resultados

ID	CE suelo mS/cm	pH suelo	N suelo ppm	P suelo pmm	K suelo pmm	Da g m ⁻³	MO %	C.E savia mS/cm	pH savia	N savia ppm	P savia ppm	K savia ppm
R1MS1	0,627	6,34	3700	237,5	183,77	0,91	6,05	15.33	5.5	248,48	176	1400
R2MS1	0,405	6,53	3700	193	144,67	1,12	6,22	15.71	5.4	101,65	132	3700
R3MS1	0,506	6,81	3700	211	391	0,85	6,38	15.14	5.3	119,72	84	4800
R4MS1	0,474	6,76	3500	152	355,81	0,66	7,93	14.22	5.4	144,57	108	5800
R1MS2	0,503	6,79	3400	110	203,32	1,33	7,70	16.24	6.4	587,31	170	7100
R2MS2	0,850	6,66	3900	110,5	258,06	1,20	7,91	16.25	6.9	858,37	188	7300
R3MS2	0,590	6,79	3700	142	289,34	1,16	7,75	15.84	7.0	948,72	170	7800
R4MS2	0,541	6,98	4100	124,5	250,24	1,14	7,20	14.59	7.1	745,43	168	7600
R1MS3	0,738	6,96	4500	189,5	179,86	1,33	8,08	15.39	7.0	813,19	206	6.700
R2MS3	0,781	6,91	5600	236	254,15	1,30	8,99	15.06	7.1	948,72	170	6.400
R3MS3	0,288	6,98	4500	188	175,95	1,28	8,73	15.00	7.1	677,66	234	6.800
R4MS3	0,711	6,64	4600	167,5	172,04	1,40	9,26	14.39	7.2	768,01	148	5.600